

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Modelování a optimalizace bezdrátové sítě TUONET v
budově FEI**

**Modeling and optimization of wireless TUONET network in
the FEI building**

2017/2018

Bc. Petr Kováčik

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Kováčik**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612T059 Mobilní technologie

Téma: **Modelování a optimalizace bezdrátové sítě TUONET v budově FEI**
Modeling and Optimization of Wireless TUONET Network in the FEI Building

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je ověřit správnost současného nastavení bezdrátové sítě TUONET v budově FEI a tuto síť zoptimalizovat.

1. Vytvoření plánů budovy FEI vhodných pro softvérovou simulaci.
2. Softvérová simulace pokrytí budovy FEI signálem WiFi dle stávajícího nastavení s využitím softvérového nástroje Wireless InSite.
3. Ověření softvérové simulace měřením.
4. Optimalizace počtu, rozmístění a nastavení přístupových bodů z hlediska pokrytí budovy signálem WiFi.

Seznam doporučené odborné literatury:

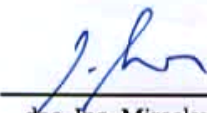
Pechač P.: Šíření vln v zástavbě, BEN, 2005, ISBN: 80-7300-186-1
Perahia E., Stacey R.: Next Generation Wireless LANs: 802.11n and 802.11ac, Cambridge University Press 2013, ISBN 978-1-107-01676-7
Wireless Insite Pro - uživatelská příručka

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Šebesta, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 26. dubna 2018

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Romanovi Šebestovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá modelováním a ověřováním bezdrátové sítě v budově Fakulty elektrotechniky a informatiky v rámci Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava.

V první polovině práce rozebírá teoretickou problematiku šíření rádiových vln v zástavbě a dále rozebírá specifikace bezdrátových sítí IEEE 802.11. Druhá část práce se zabývá modelováním budovy a následné simulace sítě v softwaru Wireless Insite od společnosti Remcom. Výsledky simulací jsou poté ověřovány měřením pomocí klientských zařízení. Na základě výsledků simulací a měření je v závěru navržnuta optimalizace této bezdrátové sítě.

Klíčová slova

IEEE 802.11; síť Wi-Fi; úroveň signálu; kanál; Wireless Insite; simulace; optimalizace; FEI;

Abstract

This diploma thesis deals with modeling and verification of the wireless network in the building of the Faculty of electrical engineering and informatics within the Technical university of Ostrava.

In the first half of the thesis it discusses the theoretical issue of radio waves propagation in the area and further analyzes the specifications of IEEE 802.11 wireless networks. The second part deals with building modeling and subsequent network simulation in Remcom's Wireless Insite software. The simulation results are then verified by measurement using client devices. Based on simulation and measurement results, the optimization of this wireless network is designed at the end.

Key words

IEEE 802.11; Wi-Fi network; signal strength; channel; Wireless Insite; simulation; optimalization; FEI;

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
λ	m	Vlnová délka
ϵ	Fm ⁻¹	Permitivita
E	NC ⁻¹	Intenzita elektrického pole
D	Cm ⁻²	Elektrická indukce
I	A	Elektrický proud
U	U	Elektrické napětí
f	Hz	Frekvence
d	m	Vzdálenost Fresnelova zlomu
h	m	Výška antén spoje
G	dB	Výkonový zisk
P	W	Výkon
c	m/s	Rychlost světla

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AP	Access Point
CAD	Computer Aided Design
CCA	Clear Channel Assessment
ČTÚ	Český Telekomunikační Úřad
DFS	Dynamic Frequency Selection
DXF	Drawing Exchange Format
ECC	Error Correction Code
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
FEI	Fakulta Elektrotechniky a Informatiky
GI	Guard Interval
GPU	Graphic Processor Unit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LOS	Line Of Sight
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
RSS	Received Signal Strength
SBR	Shooting and Bouncing Ray
SNR	Signal to Noise Ratio
WLAN	Wireless Local Area Network

Obsah

Úvod	- 12 -
1 Elektromagnetická vlna	- 13 -
2 Mechaniky šíření rádiových vln	- 14 -
2.1 Reflexe a refrakce vlny	- 14 -
2.2 Difrakce vlny	- 14 -
2.3 Vícecestné šíření signálu	- 15 -
2.4 Rozdělení buněk	- 15 -
2.5 Fresnelův zlom	- 16 -
3 Bezdrátové sítě 802.11 Wi-Fi	- 17 -
3.1 Přijímaná úroveň signálu	- 17 -
3.1.1 Hodnoty RSS v IEEE 802.11	- 18 -
3.1.2 Poměr signálu k šumu a rušení	- 19 -
3.2 Frekvenční pásma a kanály	- 20 -
3.2.1 Kanály s nutností dynamického výběru pracovní frekvence	- 22 -
3.2.2 Využití šířky kanálu 40 MHz	- 23 -
3.2.3 Vzájemné překrývání kanálů	- 23 -
3.3 Rozložení přístupových bodů v zástavbách	- 24 -
3.3.1 Vzdálenost mezi přístupovými body	- 25 -
3.4 Charakteristiky antén v sítích 802.11	- 26 -
3.4.1 Směrovost	- 26 -
3.4.2 Zisk antény	- 27 -
4 Základní fyzikální veličiny materiálů pro simulaci	- 28 -
4.1 Permittivita materiálu	- 28 -
4.1.1 Relativní permittivita	- 28 -
4.2 Konduktivita materiálu	- 28 -
5 Simulační nástroj Wireless Insite	- 29 -
5.1 Simulační engine X3D	- 29 -
6 Vytvoření modelu budovy FEI pro simulaci	- 30 -
6.1 Přenesení referenčního modelu CAD do simulačního softwaru	- 30 -
6.2 Definování materiálových vlastností	- 31 -

6.3	Omezení simulačního programu při tvorbě modelu	- 32 -
7	Simulace pokrytí budovy FEI signálem Wi-Fi	- 33 -
7.1	Umístění a konfigurace vysílacích bodů sítě.....	- 33 -
7.1.1	Vysílací a přijímací antény	- 34 -
7.2	Nastavení parametrů simulace	- 34 -
7.3	Rozložení přijímacích bodů pro simulaci.....	- 35 -
7.4	Výsledky simulací	- 35 -
7.4.1	Pásmo 2,4 GHz	- 36 -
7.4.2	Pásmo 5 GHz	- 38 -
7.4.3	Rozdíl ve vysílacím výkonu.....	- 39 -
8	Ověření výsledků simulace měření.....	- 41 -
8.1	Měřicí zařízení.....	- 41 -
8.2	Metodika měření.....	- 41 -
8.3	Výsledky měření.....	- 42 -
8.3.1	Měření úrovně signálu v čase.....	- 44 -
9	Návrh optimalizace sítě z hlediska pokrytí signálem.....	- 45 -
9.1	Návrh optimalizace pomocí redukce AP	- 45 -
9.1.1	Vliv pracovního kanálu na šíření signálu	- 47 -
9.2	Výsledky navržené optimalizace	- 47 -
9.2.1	Pásmo 5 GHz	- 47 -
9.2.2	Pásmo 2,4 GHz	- 49 -
9.2.3	Navržená optimalizace a její možný negativní dopad na síť	- 50 -
9.3	Návrh optimalizace pomocí redukce výkonu	- 50 -
9.4	Výsledky navržené optimalizace	- 50 -
9.4.1	Pásmo 5 GHz	- 50 -
9.4.2	Pásmo 2,4 GHz	- 51 -
9.5	Navržené optimalizace a jejich vztah s naměřenými výsledky	- 52 -
9.6	Alternativní návrhy optimalizací	- 52 -
10	Možnosti rozšíření práce	- 53 -
10.1	Simulace dynamického vysílaného výkonu	- 53 -
10.2	Rozšíření vlastního měření	- 53 -

Závěr	- 54 -
Použitá literatura	- 55 -
Seznam příloh	- 57 -

Úvod

Bezdrátové připojení k internetu je zvláště v České republice vůbec nejpobulárnějším způsobem připojení [1]. Důvod tkví zejména v pomalém a těžkopádném rozvoji pevných sítí. Dnešní rádiové spoje dokáží podat skvělé výsledky nejen s ohledem na rychlost přenosu dat v obou směrech, ale také v latenci a spolehlivosti. Zdarma dostupné bezdrátové sítě IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11 jsou dnes součástí téměř všech veřejných budov a nejen jich. Tyto sítě totiž samozřejmě pronikly i do soukromé a firemní sféry, kde zajišťují konektivitu napříč celými továrními halami či objekty.

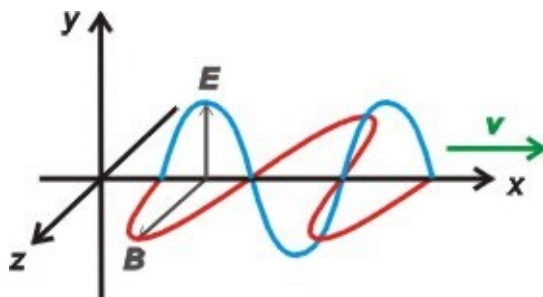
I přes nesporné výhody zejména z hlediska mobility, přináší bezdrátové sítě některá úskalí, s ohledem na jejich realizaci a zprovoznění. Tato úskalí se projevují zejména v nutnosti správné konfigurace a nastavení jednotlivých přístupových bodů (vysílačů), ale také jejich samotného počtu a rozmístění. Rozdíly mezi možnými řešeními pak tedy nejsou pouze ve výsledné kvalitě celkového pokrytí a přenosových rychlostech, ale zejména také ve finančních nákladech nutných pro dané provedení. Nároky na takové sítě poté přirozeně stoupají úměrně s jejich velikostí.

Pro určení nejlepšího možného rozložení a nastavení bezdrátové sítě, je možné využít z řady simulačních softwarových nástrojů. Tyto nástroje se specializují k podání nejpřesnějšího možného obrazu reality dané sítě. Simulační nástroje mohou být použity nejen pro návrh před samotnou realizací, ale také pro ověření a optimalizaci sítě již stávající.

V prvních dvou kapitolách se práce zaměřuje na teoretický rozbor elektromagnetické vlny a její mechaniky šíření v zástavbě. V třetí kapitole je provedeno zmapování technologie Wi-Fi, jejích parametrů a nastavení. V praktické části se práce zabývá modelováním a následnou optimalizací stávající sítě TUONET v budově FEI (*Fakulta Elektrotechniky a Informatiky*) pomocí softwarového nástroje Wireless Insite. V kapitole pět je v tomto softwaru provedeno vytvoření modelu vhodného pro simulaci dané sítě a nasimulované výsledky jsou rozebrány v kapitole následující. Na provedenou simulaci sítě navazuje ověření výsledků pomocí měření, které je rozvedeno v kapitole sedm. V předposlední kapitole je na základě simulací a vlastního měření navržena optimalizace sítě, která je poté opět simulována v softwaru Wireless Insite. V závěrečné kapitole jsou popsána možná rozšíření a navázání na výsledky uvedené v této práci.

1 Elektromagnetická vlna

Elektromagnetické vlnění (záření) je děj, při kterém se šíří prostorem dvě navzájem neoddělitelné složky. Složka elektrická, kterou charakterizuje vektor intenzity elektrického pole E a složka magnetická, kterou popisuje vektor magnetické indukce B . Tyto vektory jsou navzájem kolmé, mají souhlasnou fázi a jejich kmity probíhají napříč ke směru v , kterým se vlnění šíří. Díky souhlasné fázi navíc platí, že obě veličiny nabývají svých maximálních hodnot ve stejném okamžiku [2].



Obrázek 1.1: *Elektromagnetická vlna*

Elektromagnetické vlnění je vlnění příčné (transverzální) a má vlastnosti vlnové a kvantové. Vlnový charakter se skládá z odrazu, lomu, ohybu, interference a polarizace (kapitola 2). Kvantový charakter vlny je pak dán fotoelektrickým jevem. Jednotlivé druhy elektromagnetického vlnění se liší vlnovou délkou a společně vytváří spektrum elektromagnetického záření. Vlnovou délku lze získat výpočtem z rovnice 1.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

λ – Vlnová délka [m]

c – Rychlost světla [m/s]

f – Frekvence [Hz]

Za rádiové vlny se považuje záření o vlnové délce 1 mm až 100 000 km a frekvenci 3 Hz až 300 GHz [2].

2 Mechaniky šíření rádiových vln

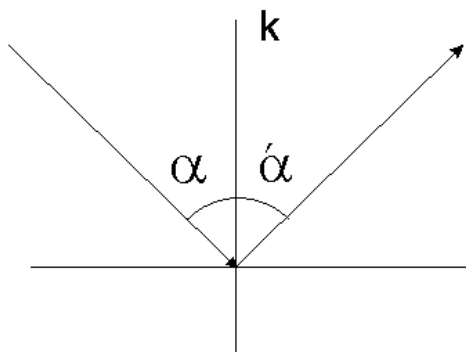
Při šíření rádiových vln v rámci pozemní komunikace se mezi vysílačem a přijímačem uplatňuje více mechanismů. Je-li mezi vysílačem a přijímačem optická viditelnost LOS (*Line Of Sight*), přenášený signál se může skrz komunikační kanál mezi těmito body šířit přímo. Ve většině praktických případů je ovšem přenášený signál veden přes nejrůznější překážky, jako jsou například povrchové a terénní nerovnosti, budovy a další objekty. Tato situace je typická zejména pro zástavbu, kde u šířené vlny dochází k interakci mezi zdivem, nábytkem a dalším vybavením interiéru. V takovém prostředí se potom kromě přímého šíření rádiových vln uplatňují i další mechaniky.

Dopadá-li světlo na rozhraní dvou optických prostředí (o různých indexech lomu), pak se částečně odráží a částečně prochází z jednoho prostředí do druhého. Tento jev nazýváme odraz a lom světla.

2.1 Reflexe a refrakce vlny

Jestliže je překážka větší oproti vlnové délce, dochází k reflexi (odrazu) vlnění. Dopadá-li světlo na rozhraní dvou optických prostředí (o různých indexech lomu), pak se částečně odráží. Další část poté prochází z jednoho prostředí do druhého. Jedná se tedy o refrakci (lom) vlnění. Tyto jevy popisuje zákon odrazu vlnění, respektive Snellův zákon lomu.

Úhel odrazu α je roven úhlu dopadu α' , přičemž odražené vlnění zůstává v rovině dopadu. Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu a svírá s kolmicí k úhel odrazu, který je stejně velký jako úhel dopadu [3].



Obrázek 2.1: Odras rádiové vlny

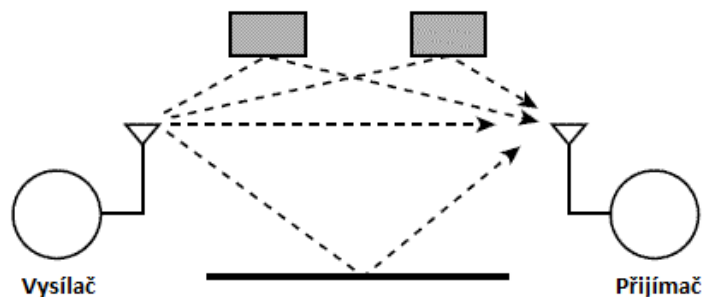
2.2 Difrakce vlny

Jestliže je překážka menší oproti vlnové délce, dochází k difrakci (ohybu) vlnění, kdy lze pozorovat šíření vln i za touto překážkou v tzv. geometrickém stínu.

Důsledkem toho může k přijímači přicházet kromě přímé vlny ještě řada odražených vln. Tento efekt nazýváme vícecestným šířením [3].

2.3 Vícecestné šíření signálu

Na přijímač tedy kromě vlny přímé dopadá velké množství vln odražených, které se šíří po různě dlouhých cestách, což způsobí časový rozdíl mezi přijetím prvního a posledního signálu. Technologie 802.11 je schopna se vyrovnat pouze s maximálním zpožděním o daném časovém limitu. V případě, že nebude dodržen tento limit, stane se přenosová cesta nefunkční. S narůstajícím zpožděním rovněž klesá přenosová rychlost spoje [3].



Obrázek 2.2: Vícecestné šíření signálu

S vícecestným šířením signálu souvisí ochranný interval GI (*Guard Interval*), což je perioda času, která je vložena mezi datové přenosy, aby nedošlo k překryvům mezi nimi. V této periodě se tedy nevysílá žádná nová informace. Standardní doba ochranného intervalu je 800 ns, ovšem novější specifikace standardu 802.11 umožňují zkrácení tohoto intervalu na polovinu. Tento interval se označuje pojmem „krátký“ ochranný interval (short GI) [4].

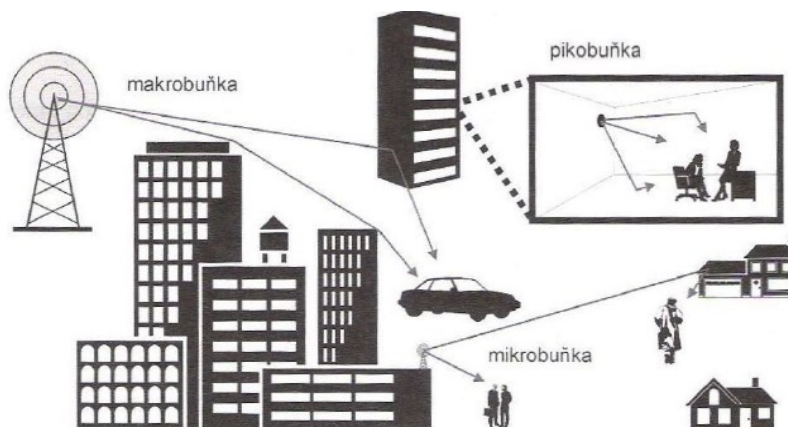
2.4 Rozdělení buněk

Charakter šíření signálu mobilním spojem je určován především umístěním antény a také okolním prostředím. Na základě těchto parametrů můžeme uvažovat o následujících buňkách [3]:

Makrobuňka – pevná anténa je umístěna ve výšce nad úrovní střech zástavby. Její poloměr se pohybuje od 1 km až do 20 km.

Mikrobuňka – pevná anténa je umístěna ve výšce pod úrovní střech zástavby. Její poloměr se pohybuje od 100 m do 1 km.

Pikobuňka – pevná anténa je umístěna uvnitř budov a typicky pokrývá uzavřené prostory. Poloměr pikobuněk se pohybuje od desítek metrů do maximálně 200 m.



Obrázek 2.3: Šíření vln a rozdělení buněk [3]

2.5 Fresnelův zlom

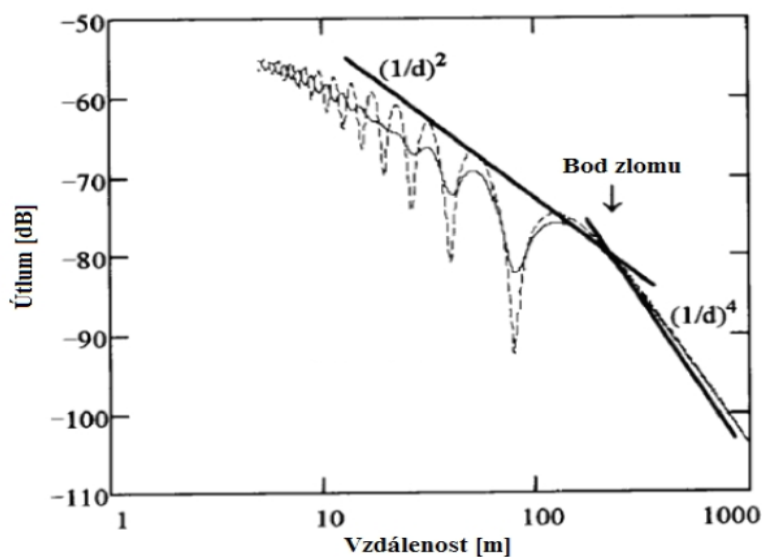
Fresnelův zlom je místo, ve kterém je dráhový rozdíl přímého a odraženého paprsku roven právě polovině vlnové délky. Jelikož se v bodě zlomu výrazně mění závislost útlumu šířením, je jeho predikce velice důležitá. V rámci makrobuněk a malých pikobuněk lze uvažovat o stavu před nebo za zlomem. U mikrobuněk je nutno pro výpočet ztrát bod zlomu zahrnout [3]. Obrázek 2.3 zobrazuje ztráty způsobené s rostoucí vzdáleností šíření. Vzdálenost Fresnelova zlomu můžeme vyjádřit vzorcem 2.1.

$$d_0 = \frac{4h_1h_2}{\lambda} \quad (2.1)$$

d_0 – vzdálenost Fresnelova zlomu [m]

h_1, h_2 – výšky antén spoje [m]

λ – vlnová délka [m]



Obrázek 2.3: Fresnelův zlom [3]

3 Bezdrátové sítě 802.11 Wi-Fi

3.1 Přijímaná úroveň signálu

Základní jednotkou v telekomunikačních systémech je decibel [dB]. Tato logaritmická jednotka vyjadřuje rozdíl v úrovni signálů. Je to fyzikálně bezrozměrná jednotka, která je dána poměrem dvou elektrotechnických veličin. Výkonový zisk G (gain) antény se dá tedy v jednotkách dB vyjádřit jako poměr výstupního výkonu k výkonu vstupnímu, jak znázorňuje rovnice 3.1.

$$G = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (3.1)$$

G – výkonový zisk antény [dB]

P_1 – vstupní výkon [W]

P_2 – výstupní výkon [W]

Nicméně pro vyjádření absolutní úrovně výkonu v dB, musíme nejdříve určit referenční vztahovou hodnotu. Typicky využívaná referenční hodnota v telekomunikačních technologiích je 1 miliwatt (mW). Poměr výkonu vztažený na 1 mW je pak označován jako dBm. Matematický zápis jednotky dBm vyjadřuje rovnice 3.2.

$$dBm = 10 \log \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad (3.2)$$

P – výkon [W]

O základním převodním vztahu mezi jednotkami ve wattech a jednotkami v dBm pojednává tabulka 3.1.

Tabulka 3.1: Převodní vztah mezi jednotkami ve W a v jednotkách v dBm

Výkon [W]	10	1	0,1	0,001	10^{-6} (1μW)	10^{-12} (1pW)
Přijímaná úroveň signálu [dBm]	40	30	20	0	-30	-90

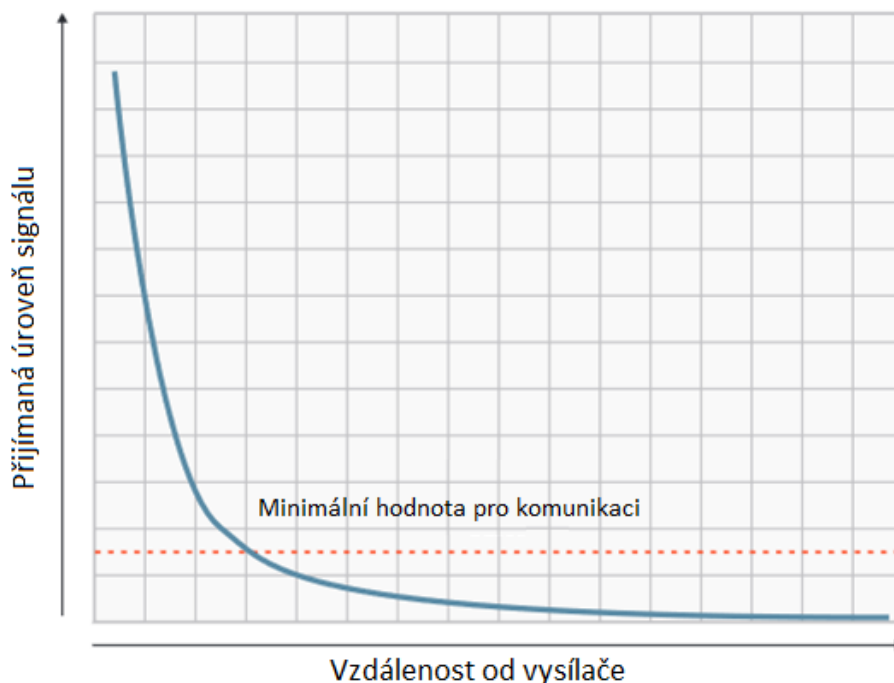
Pro bezdrátové sítě WLAN (*Wireless Local Area Network*) je stanoven od ČTÚ (Český telekomunikační úřad) maximální vyzářený izotropický výkon antény na 30 dBm, tedy 1 W, který lze však využít pouze na kmitočtech 5470 MHz až 5725 MHz. Izotropický vyzářený výkon se skládá z vyzářeného výkonu antény a jejího zisku, kdy je signál vyzařován rovnoměrně ve všech směrech. Regulované podmínky pro provoz lokálních bezdrátových sítí na dílčích kmitočtech popisuje tabulka 3.2. Plné znění podmínek pro provoz WLAN sítí v České republice stanovených ČTÚ je uvedeno v příloze A.

Tabulka 3.2: Regulační podmínky pro provoz sítí Wi-Fi stanovené ČTÚ (příloha A)

Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon	Další podmínky
2400,0 - 2483,5 MHz	100 mW e.i.r.p.	Systémy s technikou DSSS nebo OFDM
5150 - 5250 MHz	200 mW e.i.r.p.	Pouze pro využití uvnitř budovy
5250 - 5350 MHz	200 mW střední e.i.r.p.	Pouze pro využití uvnitř budovy
5470 - 5725 MHz	1 W střední e.i.r.p.	Maximální střední spektrální hustota e.i.r.p. je 50 mW/MHz v libovolném 1 MHz úseku

3.1.1 Hodnoty RSS v IEEE 802.11

Existuje mnoho faktorů ovlivňující bezdrátový přenos a jeho hodnotu přijímané úrovně signálu, označovanou jako RSS (*Received Signal Strength*). Mohou to být odrazy signálu od statických či pohyblivých se předmětů v prostoru, rozptyl signálu od prvků s reflexním povrchem. Dále také například refrakce (lom), kdy dochází ke změně směru vlnění při průchodu mezi prostředím s jinou optickou hustotou. Útlum RSS je přímo závislý na zvyšující se vzdálenosti zařízení od přístupového bodu (obrázek 3.1).



Obrázek 3.1: Závislost úrovně signálu na vzdálenosti [5]

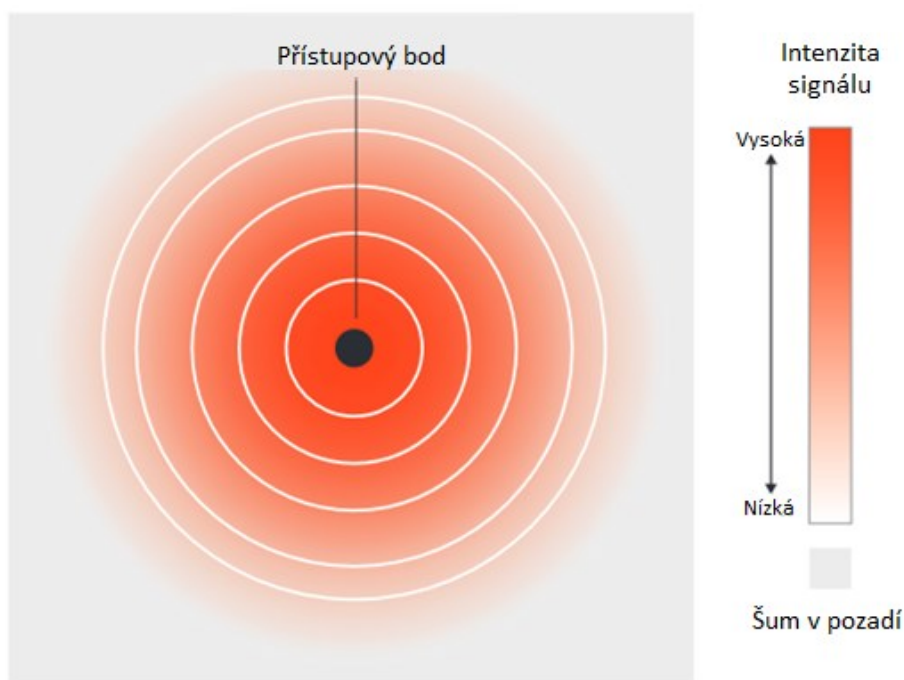
Minimální hodnoty RSS pro síť Wi-Fi udává výrobce zařízení a závisí na konkrétním přijímači, okolním prostředí i na použitém doplňku standardu IEEE 802.11. Přehled minimální přijímané úrovně signálu pro Cisco Aironet řady 2600 pojednává tabulka 3.3.

Tabulka 3.3: *Minimální přijímaná úroveň signálu pro Cisco Aironet řady 2600 [6]*

Vysílací standard IEEE	802.11b	802.11g	802.11a	802.11n (2,4 GHz)	802.11n (5 GHz)
Minimální přijímaná úroveň signálu [dBm]	-100	-91	-92	-91	-92

3.1.2 Poměr signálu k šumu a rušení

Kritickým faktorem pro výsledné připojení však není samotná hodnota RSS, ale poměr signálu k šumu SNR (*Signal to Noise Ratio*). Čím vyšší je tento parametr, tím vyšší datové propustnosti a nižšího poměru chyb ve vysílaném kanálu můžeme dosáhnout. Okolní šum je přítomný ve všech prostředích v konstantní průměrné intenzitě, není závislý na okolních komunikačních zdrojích a nelze jej zcela odstranit.



Obrázek 3.2: *Intenzita signálu v závislosti na šumu v pozadí [5]*

Nejnižší hodnota RSS pro dosažení dostatečného SNR a tím daných datových rychlostí se nazývá citlivost (sensitivita). Pokud je RSS příliš nízká pro aktuální datovou propustnost, stane se datový přenos nespolehlivým. Tento jev se řeší změnou typu modulace vysílaného signálu, nebo změnou poměru kódování pomocí samoopravných kódů ECC (*Error Correction Code*). Dochází ke snížení datového toku, dokud SNR není tak nízký i pro komunikaci na nejnižší možné

datové propustnosti. Poté dojde ke ztrátě a výpadku spojení. Degradace datové propustnosti v závislosti na minimální přijímané úrovni signálu popisuje tabulka 3.4.

Tabulka 3.4: *Sensitivita 802.11g pro směrovač Cisco Aironet řady 2600 [6]*

Datová propustnost [Mbit/s]	6	9	12	18	24	36	48	54
Minimální přijímaná úroveň signálu [dBm]	-91	-91	-91	-90	-87	-85	-80	-78

Rušení od odlišných signálů a služeb než Wi-Fi má mnohem větší dopad na datovou propustnost, než špatně spravovaná energie dalších Wi-Fi vysílačů. Je to proto, že 802.11 používá přístupové mechanismy založené na konfliktu pro koordinaci přístupu stanic ke kanálu. Zařízení odlišných služeb, které pracují ve stejném pásmu, se těmito technikami zpravidla neřídí a často porušují mechanismy zařazování do fronty a zpětného odposlechu. Tímto nutí všechny stanice v dosahu počkat, dokud nebude pásmo volné pro komunikaci.

Při vývoji a testování standardu IEEE 802.11, existovaly velké obavy, že by technologie Wi-Fi způsobovala rušení služeb ostatním licencovaným službám pracujícím ve stejných kmitočtových pásmech. V současné době existuje řada spotřebních zařízení, jako jsou například mikrovlnné trouby či lékařské přístroje založené na diatermii, které sdílejí průmyslové, vědecké a lékařské pásmo ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) společně s Wi-Fi [4].

Problémem je, že ačkoliv tato zařízení pracují pod stejnými omezeními výkonu, tak jako zařízení technologie 802.11, nejsou nijak nucena uvolnit pásmo pro přenos Wi-Fi signálu a většina z nich to také nedělá. To způsobuje a vytváří problémy pro běžné operace, protože Wi-Fi směrovač může klasifikovat signál pouze jako:

- signál Wi-Fi (zjištěný signál může být demodulován)
- šum (veškerý odlišný signál je považován za šum)

Dopad rušivého signálu je logaritmický ve své účinnosti na provoz sítě Wi-Fi. Čím vyšší bude zatížení a využití sítě 802.11, tím více destruktivní rušivý signál bude. To znamená, že pokud je rušení přítomné a síť je jen nepatrně využita (například v rámci spektra je k dispozici dostatečný pracovní cyklus), přítomnost rušivého signálu nemusí být ani patrná. Je zde prostor pro sdílení spektra. Pokud je však síť Wi-Fi vysoce využívána, může mít okolní šum velký a znatelný efekt na chod sítě [8].

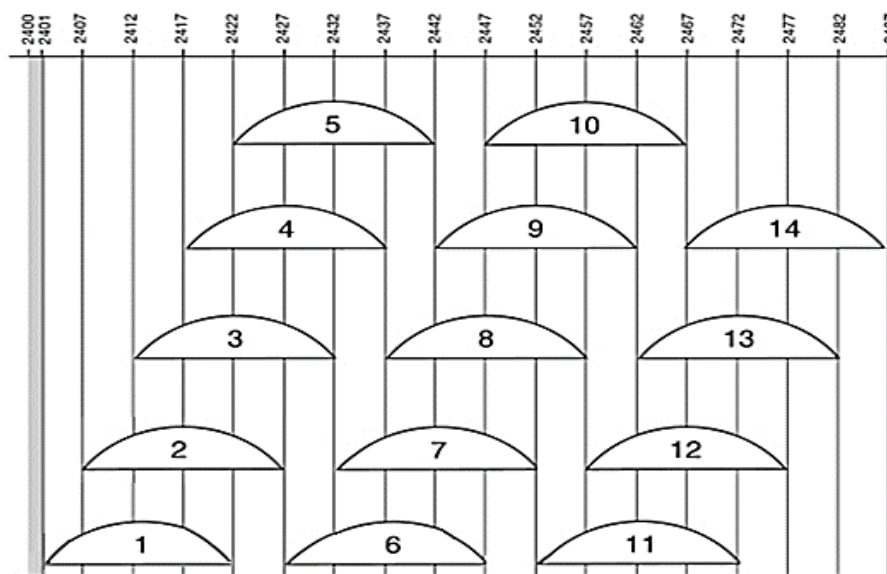
3.2 Frekvenční pásma a kanály

Bezdrátové sítě založené na standardu IEEE 802.11 mohou pracovat v pásmu 2,4 GHz (2,4 až 2,483 GHz), kdy pro Českou republiku je k dispozici 13 kanálů, s odstupem 5 MHz. Šířka kanálu Wi-Fi je rozdílná pro jednotlivé doplňky standardu 802.11 (tabulka 3.5).

Tabulka 3.5: *Přehled šířek kanálů v jednotlivých doplňcích [4]*

Označení standardu IEEE	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac	802.11ad
Šířka kanálu [MHz]	22	20	22	20	20, 40	20, 40, 80, 160	2160

Šířka Wi-Fi kanálu standardu 802.11n tak zabírá 20 MHz nebo 40 MHz, jednotlivé kanály se tedy překrývají (obrázek 3.3).



Obrázek 3.3: *Šířky kanálů v pásmu 2,4 GHz o šířce 20 MHz [5]*

Tabulka 3.6: *Přehled povolených kanálů a jejich středních frekvencí pro pásmo 2,4 GHz*

Číslo kanálu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Střední frekvence [MHz]	2412	2417	2422	2427	2432	2437	2442	2447	2452	2457	2462

Přehled konkrétních kanálů a jejich středních pracovních frekvencí je uvedeno v tabulce 3.6. Kanály s číslem 12 a 13 jsou v České republice rovněž povoleny, ovšem kanál s číslem 14 povolen není (tabulka 3.7).

Tabulka 3.7: *Přehled zbývajících kanálů a jejich středních frekvencí pro pásmo 2,4 GHz*

Číslo kanálu	12	13	14
Střední frekvence [MHz]	2467	2472	2484

Druhým frekvenčním pásmem je pásmo 5 GHz (5,180 GHz až 5,725 GHz). V Evropě je dostupných 19 kanálů, ze kterých je prvních 5 (kanály 32–48, 5,160–5,240 GHz) určeno pro využití uvnitř budov. Maximální vysílací výkon je zde tedy omezen na 200 mW. Kanály

52 až 68 (5,26 GHz až 5,34 GHz) jsou rovněž určeny pro využití uvnitř budov, zařízení však musí mít automatickou regulaci výkonu v rozsahu -3dB, a dále musí dynamicky vybírat pracovní kmitočet. Maximální vysílací výkon je rovněž 200 mW. Plné znění legislativy vydané ČTÚ je uvedeno v příloze A.

Tabulka 3.8: *Přehled kanálů pro použití uvnitř budov pro pásmo 5 GHz*

Číslo pracovního kanálu	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68
Střední frekvence [MHz]	5160	5180	5200	5220	5240	5260	5280	5300	5320	5340

Zbývajících 11 kanálů (kanály 100–140, 5,470–5,725 GHz) lze použít v zástavbách i mimo ně, vysílací zařízení musí být vybavena dynamickým výběrem frekvencí a regulací výstupního výkonu. Kanály 100 až 140 mají omezený maximální výstupní výkon na 1 W. Přehled kanálů a jejich středních frekvencí zobrazuje tabulka 3.9.

Tabulka 3.9 *Přehled kanálů pro použití v zástavbách i mimo ně v pásmu 5 GHz*

Číslo pracovního kanálu	100	104	108	112	116	120	124	128	132	136	140
Střední frekvence [MHz]	5500	5520	5540	5560	5580	5600	5620	5640	5660	5680	5700

3.2.1 Kanály s nutností dynamického výběru pracovní frekvence

Technika dynamického výběru pracovní frekvence DFS (*Dynamic Frequency Selection*) byla implementována proto, aby přístupové body AP (*Access Point*) a klienti mohli sdílet pásmo společně s radarovými zařízeními. DFS podrobně popisuje, jak je detekován radar a co by mělo být provedeno v případě jeho zjištění. Přístupové body, které pracují na kanálech DFS, musí nejprve naslouchat kanálu po dobu 60 sekund a zjistit, zda je přítomen radar před přenosem jakékoliv energie. Pokud přístupový bod pracuje na kanálu DFS a detekuje radar, musí vypnout operace na daném kanálu a opustit ho po dobu 30 minut, než může být tento kanál znovu hodnocen pro použití [8].

Klientská podpora pro kanály DFS je však nekonzistentní. Klientská zařízení nemají schopnost detekovat radar a spoléhají se na infrastrukturu přístupových bodů certifikovaných systémem DFS. Většina klientů dnes podporuje kanály 52-64. Klientská podpora pro kanály 100-140 má pomalejší nástup, avšak stále se rozšiřuje [8]. Často jde nejen o hardware, ale i o verzi ovladače pro klienta, která určuje jeho rozsah provozních kanálů.

Využití kanálů, které nejsou podporovány všemi klienty, může mít za následek nekonzistentní pokrytí, a tedy výpadky připojení pro tyto klienty.

3.2.2 Využití šířky kanálu 40 MHz

Při využití standardu 802.11n lze uvažovat o vysílané šířce kanálu 40 MHz (u standardu 802.11ac až o šířce kanálu 160 MHz). Toho je dosaženo spojením dvou kanálů 20 MHz. Důsledkem zvýšení šířky se společně výrazně zvýší datová propustnost. To je však ve většině případů praktické pouze v pásmu 5 GHz, jelikož pásmo 2,4 GHz je již omezeno počtem dostupných kanálů. V případě nutnosti opětovného využití přiřazených kanálů v pásmu 5 GHz, lze optimálnějších výsledků dosáhnout za striktního použití šířky 20 MHz, a tím zabránění ztrátě účinnosti v důsledku vzájemného překrývání kanálů.

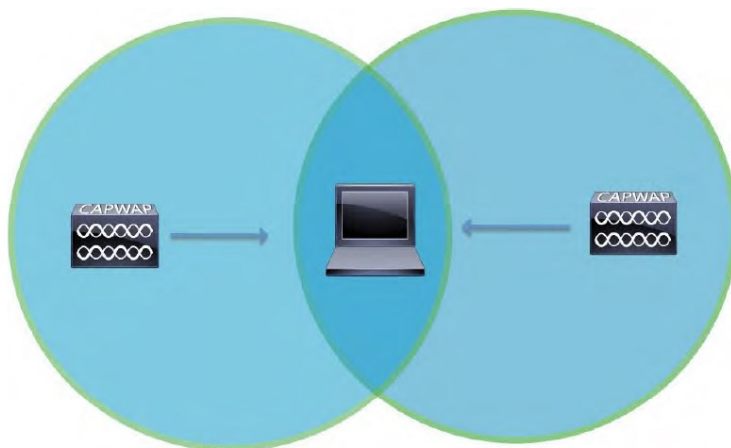
3.2.3 Vzájemné překrývání kanálů

Vzájemné překrývání kanálů je faktor, který je důležitý z hlediska chování a výkonu sítí 802.11. Jedná se o jev, kdy přenosy z jednoho zařízení 802.11 vyzařují do přijímacího rozsahu dalších zařízení 802.11 na stejném kanálu, což způsobuje rušení a snižuje dostupné spektrum a výslednou kvalitu připojení. Vzájemné překrývání kanálů může způsobit zpoždění přístupu ke kanálu, stejně jako kolize v přenosu. Obrázek 3.4 znázorňuje, jak se vzájemně ovlivňují přístupové body na stejném kanálu.

Sítě 802.11 jsou založeny na principu konfliktu a spoléhají se na mechanismy stanovení volného kanálu CCA (*Clear Channel Assessment*), které posuzují stav média (pokud je obsazeno – čeká, pokud je volno – vysílá). V uvedeném příkladu na obrázku 3.4 je výkon tohoto klienta ovlivněn, protože může přijímat signál z obou přístupových bodů. K tomuto klientovi jsou dvě buňky AP spojeny nebo jednají jako jedna buňka.

Pro vzestupný směr budou přenosy obou přístupových bodů klientem považovány za obsazený kanál a klient bude čekat na příležitost k přenosu. V případě sestupného směru přenosu se přenosy z obou přístupových bodů potenciálně zkolidují a opakované pokusy zvětší nárok na přenosové médium a sníží celkovou rychlost dat. Účinky vzájemného překrývání kanálů nejsou omezeny pouze na buňky tvořené přístupovými body. V prostředí s vysokou hustotou zařízení samotní klienti rozšiřují celkovou velikost buněk.

CCA je založen na prahové hodnotě pro příjem, která vyhodnocuje vhodnou nosnou vlnu pro přenos. Obecně platí, že jako prahovou hodnotu lze z tohoto hlediska chápat úroveň -85 dBm [8].



Obrázek 3.4: Překrývání buněk v sítích Wi-Fi [8]

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.2, v pásmu 2,4 GHz existují tři nepřekrývající se kanály, při využití šířky kanálu 20 MHz, pomocí kterých lze dosáhnout absolutní izolace. Radiofrekvenční vlastnosti 2,4 GHz signálu mu dávají delší dosah šíření a nižší útlum, než signály operující v pásmu 5 GHz. V prostředí zástaveb tedy často existuje pouze možnost opětovného využívání již alokovaných kanálů. Optimální opětovné využití kanálu v takové oblasti však není možné jednoznačně odhadnout bez pečlivých pokročilých průzkumných technik. Výsledky rozložení se budou lišit od nezvýšení šířky pásma až po mírné navýšení kapacity a budou se lišit od sítě k síti. Přidání více přístupových bodů může snížit počet uživatelů na buňku a poskytnou větší plochu pokrytí. Ovšem při zaplnění pásma, takováto jedna velká buňka pokrývající podlaží bude vykazovat omezené přenosové rychlosti a nekvalitní připojení pro všechny účastníky sítě.

Je-li nutné maximálně optimalizovat pásmo 2,4 GHz, je možné zvýšit šířku kanálu a efektivitu buněk fyzickým omezením šíření signálu pomocí směrových antén a možnostmi kreativního umístění vysílacích bodů sítě. To však vyžaduje pečlivé měření a návrh. Na rozdíl od 2,4 GHz má 5 GHz pásmo mnohem více kanálů, ve kterých síť může operovat (viz kapitola 3.2) a tato problematika je v ní značně upozaděna a potlačena [8].

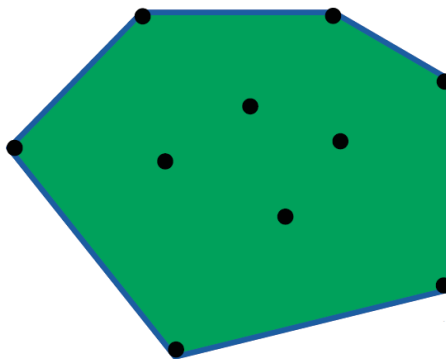
3.3 Rozložení přístupových bodů v zástavbách

Často jednou z největších výzev v zástavbách při jejich zasíťování pomocí standardu 802.11 je umístění přístupových bodů a celková estetika sítě. Nejlepším přístupem k této problematice je provést kvalifikovaný průzkum a případně také softwarovou simulaci. Jakmile jsou přístupové body připevněny napevno na příslušnou příčku, fyzická úprava se stává mnohem složitější a nákladnější.

V mnoha stávajících zástavbových bezdrátových sítích LAN jsou přístupové body distribuovány převážně po celém vnitřním prostoru a poskytují služby do prostor okolních. U konstrukce připravené pro umístění je důležité zajistit, aby přístupové body nebyly pouze v interiéru a ve středu podlaží. Spíše by měly přístupové body umístěné v obvodu doplňovat přístupové body pracující ve vnitřních místnostech na podlaží. Kromě toho by přístupové body měly být umístěny v každém ze čtyř rohů podlaží a ve všech dalších rozích, které se vyskytují

podél obvodu podlaží. Tyto obvodové přístupové body hrají zásadní roli při zajišťování dobrého pokrytí v oblastech, které obklopují a v některých případech se mohou podílet také na poskytování širšího pokrytí v okolí budovy [9].

Přístupové body, které tvoří obvod a rohy podlaží mohou být chápány jako ohraničení konvexního trupu nebo jako soubor vysílačů, ve kterém chceme síť provozovat. Dle definice, konvexní trup složený z S bodů může být považován za nejmenší polygon P , pro který je každý bod S umístěn buď na hranici nebo uvnitř P [9].



Obrázek 3.5: Znárodnění koncepce konvexního trupu. [9]

Dle obrázku 3.5 předpokládáme, že sada přístupových bodů je označena černými tečkami, které označujeme jako sadu bodů S . Konvexní trup je znázorněn jako elastický pás (modrou čarou), která je nerovnoměrná a její oblast je definována nejvzdálenějšími členy sady (v tomto případě obvodové a rohové přístupové body).

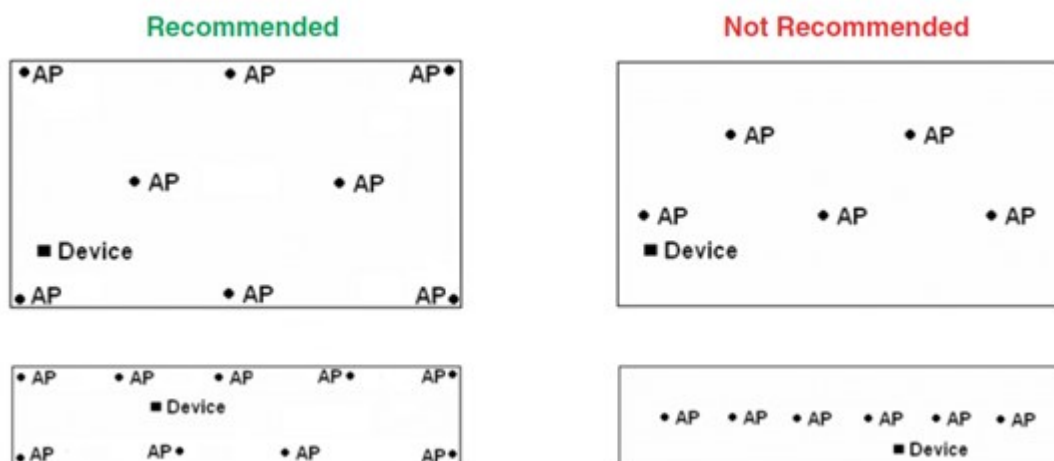
Oblast interiéru zahrnutá v tomto pásmu (zobrazená zeleně) lze považovat za prostor nutný k pokrytí. Jelikož uživatelská zařízení se mohou nacházet i v oblasti mimo konvexní trup (mimo zelenou plochu), kvalita připojení se zde může začít zhoršovat. Přestože se degradace spojení může lišit v závislosti na počtu rozmístěných přístupových bodech a jejich vzdálenosti mezi nimi, je obecně dáno, že rychlost této degradace je téměř lineární, jelikož se zařízení pohybuje dále a dále mimo konvexní trup [9].

3.3.1 Vzdálenost mezi přístupovými body

Vzdálenost mezi nasazenými přístupovými body může ovlivnit výkonnost celé sítě, stejně jako výkon datových aplikací. Z pohledu umístění obvykle není doporučena velmi malá, nebo naopak velmi velká vzdálenost odstupů mezi přístupovými body.

Nadměrná vzdálenost mezi přístupovými body může snížit datovou propustnost tím, že při delší vzdálenosti neposkytuje dostatečnou intenzitu signálu. Nedostatečná vzdálenost mezi přístupovými body může vystavit systém vlivům zkreslení antény s krátkým dosahem, což může také nepříznivě ovlivnit datovou propustnost. Z hlediska celistvosti sítě je vzdálenost mezi přístupovými body jedním z klíčových faktorů, které určují, zda budou požadované prahové

hodnoty minimálních úrovní signálu, prahové hodnoty datových rychlostí, poměry signálu k šumu (SNR) a požadované pokrytí splněny [9].



Obrázek 3.6: Ideální rozložení přístupových bodů dle Cisco wireless design guide [9]

3.4 Charakteristiky antén v sítích 802.11

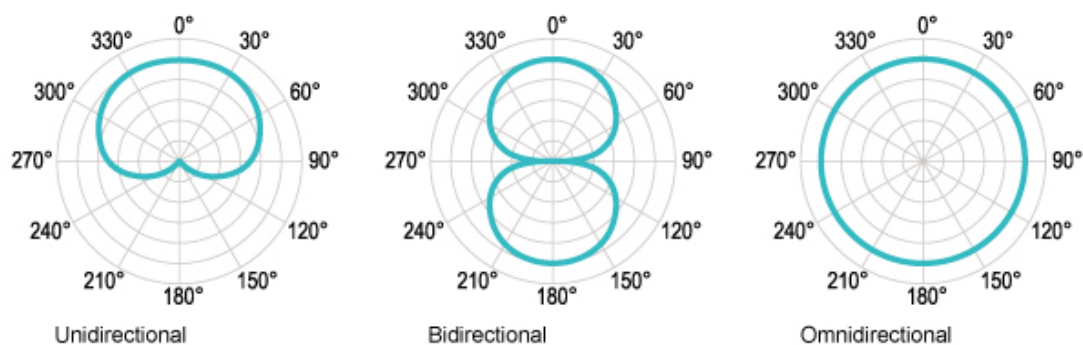
Antény, nezbytné součásti průmyslového bezdrátového systému jsou prostředkem napojení vysílače na médium, v tomto případě na volný prostor. Anténa je elektromagnetickým zářičem. Vytváří elektromagnetické pole jdoucí z vysílající antény do antény přijímače, který následně přeměňuje elektromagnetické vlnění na elektrické signály, jež jsou aplikovány v počátečních stupních přijímače.

3.4.1 Směrovost

Požadavek na směrovost antény vyplývá z toho, že se v místě příjmu většinou vyskytuje kromě přímého signálu i několik signálů odražených, které jsou vzhledem k delší dráze časově posunuty. Anténa, která přijímá signál z jednoho směru lépe než z jiných směrů, se nazývá směrová anténa. Směrová charakteristika antény znázorňuje poměrné zesílení (v decibelech) signálů dopadajících na anténu z různých směrů. Existuje několik různých typů antén, lze je však rozdělit do tří širokých kategorií:

- Všesměrové antény šíří signál všemi směry.
- Sektorové antény šíří signál omezeným způsobem definovaným konkrétním úhlem.
- Směrové antény mají úzký paprsek dovolující vysoce směrové šíření. Každá má jedinečné charakteristiky a využití.

Vzory šíření jsou zobrazeny na polárním diagramu (obrázek 3.7) [12].



Obrázek 3.7: Vzory šíření signálu

3.4.2 Zisk antény

Všechny antény vykazují pasivní zisk, který slouží k zesilování signálu. Pasivní zisk se měří veličinou dBi, která znamená zisk izotropní antény. Izotropní anténa je teoretická a vyznačuje se vyzařováním energie rovnoměrně ve všech směrech. Zisk ideální antény s půlvlnným dipólem činí 2,15 dBi. Je nutno také poznamenat, že s rostoucí směrovostí roste rovněž zisk.

EIRP (*equivalent isotropically radiated power*) neboli ekvivalentní (či efektivní) izotropně vyzářený výkon je veličinou maximálního výkonu a teoretická izotropní anténa by vyzařovala ve směru maximálního zisku antény. EIRP zohledňuje ztráty z přenosových vedení a konektorů a zahrnuje skutečný zisk antény. EIRP dovoluje výpočet hodnot skutečného výkonu a síly pole, jsou-li známy skutečný zisk antény a výstupní výkon vysílače [12].

4 Základní fyzikální veličiny materiálů pro simulaci

4.1 Permittivita materiálu

Permittivita je fyzikální veličina popisující vztah mezi vektory elektrického pole a elektrické indukce. Pro střídavé elektromagnetické vlnění je permittivita představována funkcí závislou na frekvenci vlnění a je komplexní. Permittivitu lze určit ze vztahu 4.1, kde D je elektrická indukce a E intenzita elektrického pole [10].

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad (4.1)$$

ε – permittivita [Fm^{-1}]

D – elektrická indukce [Cm^{-2}]

E – intenzita elektrického pole [NC^{-1}]

4.1.1 Relativní permittivita

Jako relativní permittivita (dříve dielektrická konstanta) se označuje podíl permittivity daného materiálu a permittivity vakua, tedy vztah s označením 4.2.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (4.2)$$

ε_r – relativní permittivita [-]

ε – permittivita materiálu [Fm^{-1}]

ε_0 – permittivita vakua [Fm^{-1}]

Relativní permittivita je látková konstanta, která vyjadřuje, kolikrát se elektrická síla zmenší v případě, že tělesa s elektrickým nábojem jsou místo ve vakuu umístěna v látkovém prostředí (též kolikrát se zvětší kapacita kondenzátoru, umístí-li se mezi elektrody dielektrikum). Její hodnota závisí na vlastnostech daného materiálu, jde tedy o materiálovou konstantu [8].

4.2 Konduktivita materiálu

Konduktivita (měrná elektrická vodivost) popisuje schopnost látky vést elektrický proud. Konduktivita je rovněž převrácenou hodnotou rezistivity (měrného elektrického odporu). Základní vztah popisuje rovnice 4.3, kde I je elektrický proud procházející materiálem, U je elektrické napětí, G je vodivost materiálu [10].

$$G = \frac{I}{U} \quad (4.3)$$

G – elektrická vodivost [S]

I – elektrický proud [A]

U – elektrické napětí [V]

5 Simulační nástroj Wireless Insite

Simulační nástroj Wireless InSite od firmy Remcom je software pro analýzu propagace rádiových vln specifických pro danou lokalitu a analýzu bezdrátových komunikačních systémů. Software poskytuje efektivní a přesné předpovědi charakteristik šíření elektromagnetických vln a komunikačního kanálu v komplexních městských, vnitřních, venkovských i smíšených lokalitách.

5.1 Simulační engine X3D

Engine X3D je interní propagační model společnosti Remcom, který poskytuje přesný 3D model plného šíření, je schopen pracovat na grafické procesorové jednotce GPU (*Graphic Processor Unit*) a využívat vícevláknové zpracování pro zrychlení výpočetních časů. Pro výpočty pomocí grafických procesorů využívá technologii Nvidia CUDA. X3D ovšem také podporuje výpočty založené na procesorech bez dodatečné hardwarové akcelerace.

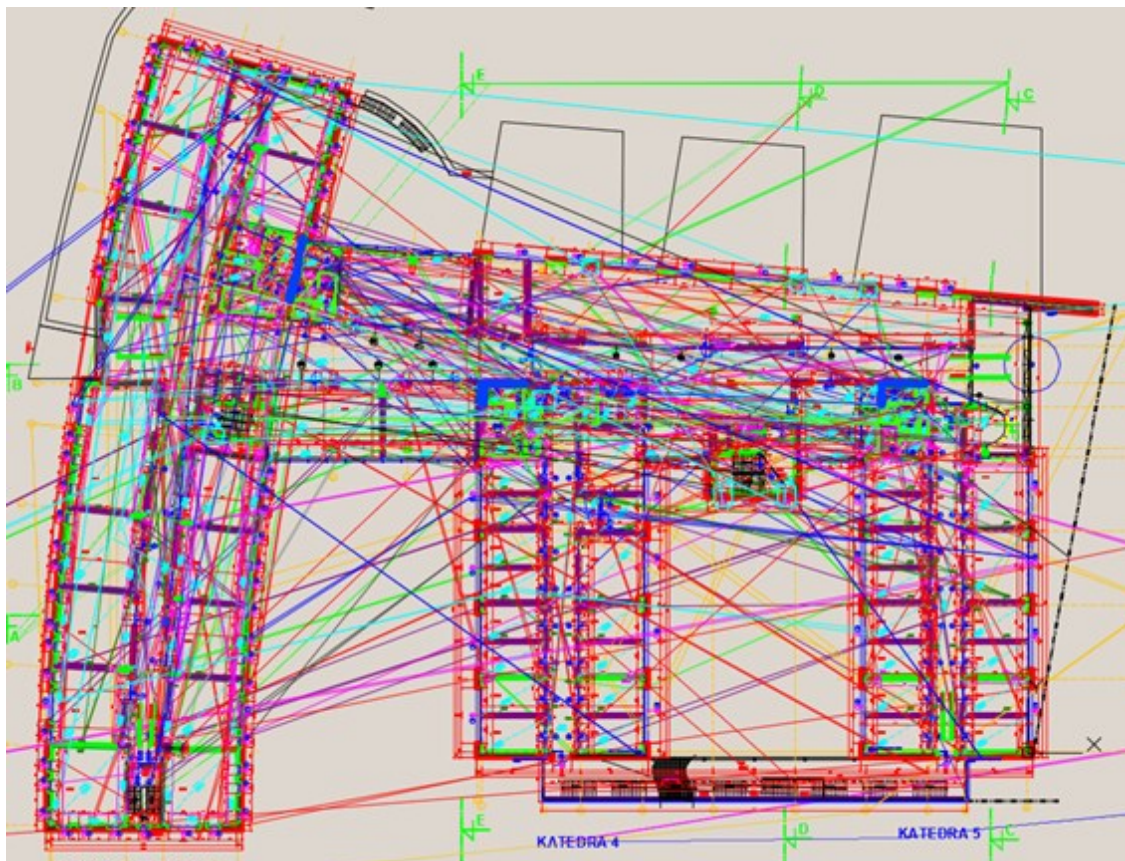
Tento propagační model používá kalkulační algoritmy od firmy Remcom pro výpočty exaktních tras, které nahrazují nedostatky kalkulačních metod typu SBR (*Shooting and Bouncing Ray*) [11]. X3D podporuje jakýkoli tvar geometrie nebo výšky vysílače či přijímače. Model zahrnuje odrazy, přenosy a difrakce spolu s frekvenční závislostí absorpce atmosféry. Standardní metoda SBR vyžaduje, aby kolem umístění přijímačů byl vytvořen poloměr kolekce, který kompenzuje odchylku šíření jednotlivých paprsků. Paprsky, které protínají tuto oblast, se poté považují za dosažitelné přijímačem. X3D upravuje výpočty šíření SBR tak, aby dosahovaly přesné místo přijímače. Tato korekce snižuje chyby ve vypočteném výkonu a fázi, bez nárůstu nároků na výpočetní časy vyžadovaných metodami založenými na tzv. teorii obrazu.

Engine X3D umožňuje sledování paprsků pro simulaci antén MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) pro 5G, Wi-Fi a další aplikace. Dále podporuje lokální rozdělení vysílačů a přijímačů podle sad nebo bodů. To umožňuje provádět několik simultánních simulací podle dostupných hardwarových prostředků. Pro neurčité a proměnné vlastnosti materiálu, kmitočtu a vstupního výkonu vysílače lze tyto vlastnosti definovat a využít výpočty na základě algoritmu Monte Carlo k analýze dopadu proměnných vstupních parametrů na přijímanou úroveň signálu a ztráty či zisk šířením signálu [11].

6 Vytvoření modelu budovy FEI pro simulaci

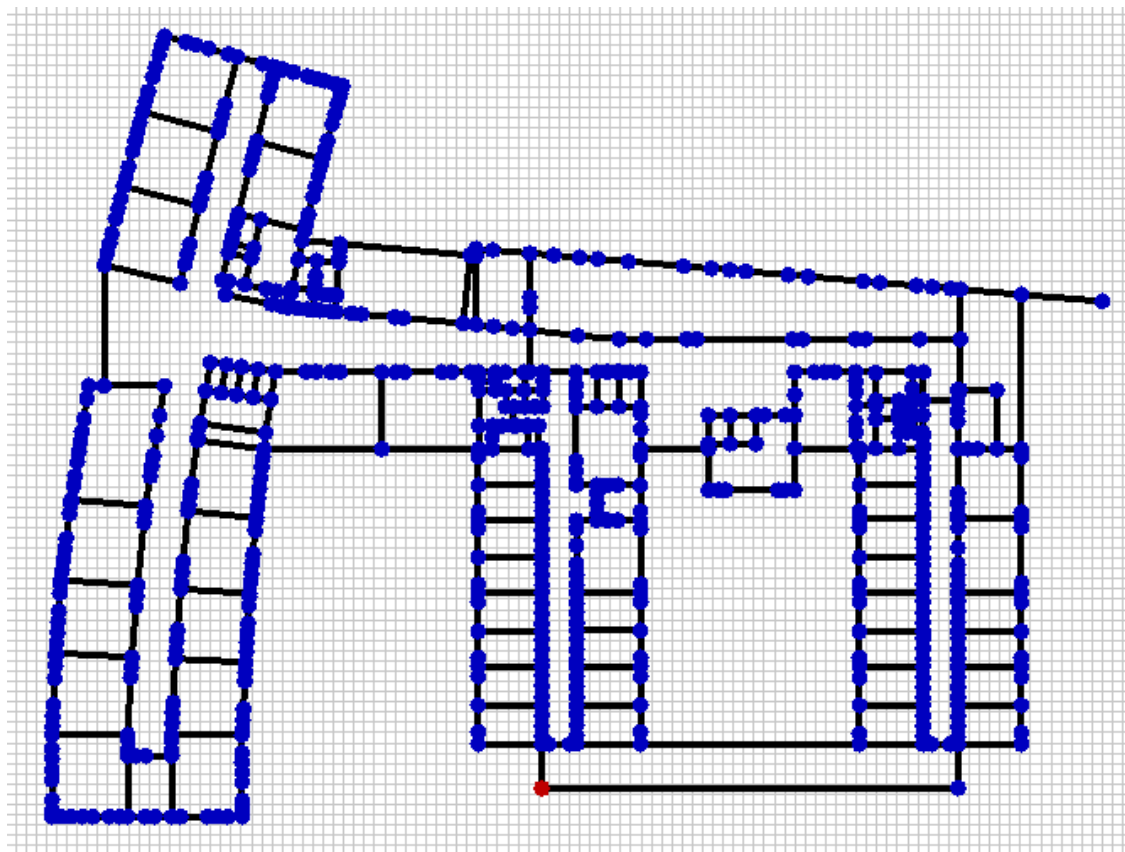
6.1 Přenesení referenčního modelu CAD do simulačního softwaru

Pro vytvoření modelu budovy vhodného pro simulaci v programu Wireless Insite byly použity podklady pro projektování a konstruování CAD (*Computer Aided Design*), vyvinuté firmou Autodesk. Tyto plány obsahují konstrukční půdorysy a řezy všech modelovaných podlaží v rámci budovy. Pro náhled a editaci příslušných plánů bylo využito softwaru AutoCAD 2017 od téže firmy (obrázek 6.1).



Obrázek 6.1: Barevně invertovaný náhled půdorysu třetího podlaží budovy v AutoCAD 2017

Pro kompatibilitu se softwarem Wireless Insite je nutné tyto soubory zkonvertovat do formátu DXF (*Drawing Exchange Format*). Tento formát je přímo navržen pro výměnu dat mezi programem AutoCAD a externím softwarem. Plány dané budovy ovšem obsahují programem Wireless Insite nepodporované značky a objekty, jako jsou například schody, topení, klimatizace a podobně [11]. Tyto značky poté vytváří ve výsledném importu v softwaru stěny navíc, či jinak daný výsledek zcela znehodnocují. Nabízí se editace a úprava plánů v programu AutoCAD 2017. Tato úprava je však časově a technicky velice náročná, z tohoto důvodu došlo k překreslení plánů do simulačního programu ručně. Jako reference posloužily již zmíněné plány CAD.



Obrázek 6.2: *Náhled překresleného půdorysu třetího podlaží budovy ve Wireless Insite*

Z výše uvedeného obrázku je zřejmé, že výsledný daný simulační model se poté opět skládá z jednotlivých podlaží, kde každé podlaží má definovány stěny. Tyto stěny jsou vždy ohraničovány vrcholy.

6.2 Definování materiálových vlastností

Každé stěně ohraničené vrcholy je třeba definovat materiál, ze kterého se skládá. Vlastnosti daného materiálu se poté odráží ve výsledcích a kalkulacích softwarové simulace. Wireless Insite definuje materiálové vlastnosti pomocí dvou základních parametrů – permitivity a konduktivity (vodivosti). Obě tyto vlastnosti jsou popsány v kapitole 4. Jelikož software Wireless Insite obsahuje databázi pouze základních konstrukčních materiálů budov, je výsledný model složen z těchto materiálů, které popisuje tabulka 6.1.

Tabulka 6.1: *Tabulka použitých materiálů a jejich simulačních parametrů*

Materiál	Permitivita	Konduktivita	Použité šířky [cm]
Sádrokarton	2,8	0,001	10; 15; 20
Cihelné tvárnice	4,44	0,001	20; 18
Železobeton	9	0,015	20; 25; 30
Dřevo	5	0	3
Sklo	2,4	0	3

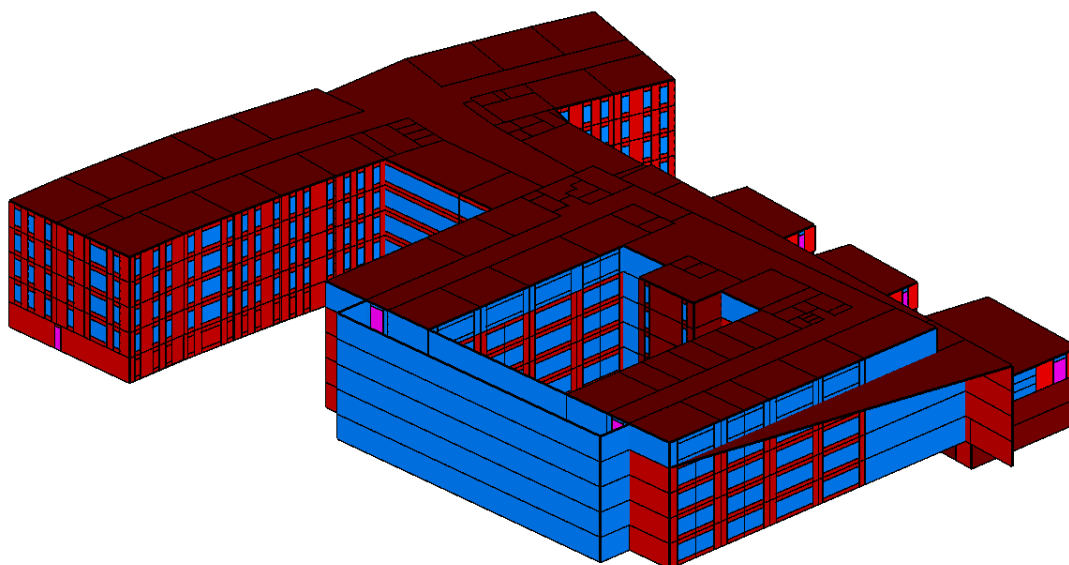
6.3 Omezení simulačního programu při tvorbě modelu

Pro potřeby simulace došlo v určitých směrech ke změnám a zjednodušení modelu budovy vzhledem k referenční kopii CAD. Tato zjednodušení vycházejí z vlastností simulačního programu.

Jak již bylo popsáno v kapitole 6.1, v rámci tvorby modelu nelze vytvořit schodiště. Daná podlaží tedy nejsou schodištěm propojena, je zde rovná podlaha napříč celým podlažím. Dalším omezením je nemožnost zakreslení geometricky oblých tvarů a stěn. V budově FEI se nachází například sloupy ve tvaru válce, místnost správce budovy má tvar půlkruhu a stěny v křídle budovy s laboratořemi jsou rovněž zaoblené. Tyto odchylky od standartní konstrukce většiny budov nelze jakkoliv v programu zakreslit, tudíž jsou ponechány rovné. Tato geometrická omezení mají vliv zejména na výpočty mechanik šíření vln prostorem (kapitola 2). Posledním omezením z tohoto hlediska je nemožnost práce editoru ve vertikálním režimu. Budova tedy byla sestavena výhradně z předloh půdorysů, příčky v řezu byly tímto postupem zjednodušeny.

Široká škála materiálů, ze kterých se budova skládá byla pro potřeby simulace v modelu také redukována na materiály, které simulační software obsahuje. Tabulka materiálů je uvedena v kapitole 6.2.

Náhled výsledného modelu budovy v softwaru Wireless Insite je uveden na obrázku 6.3.

Obrázek 1.2: *Výsledný model budovy FEI v programu Wireless Insite*

7 Simulace pokrytí budovy FEI signálem Wi-Fi

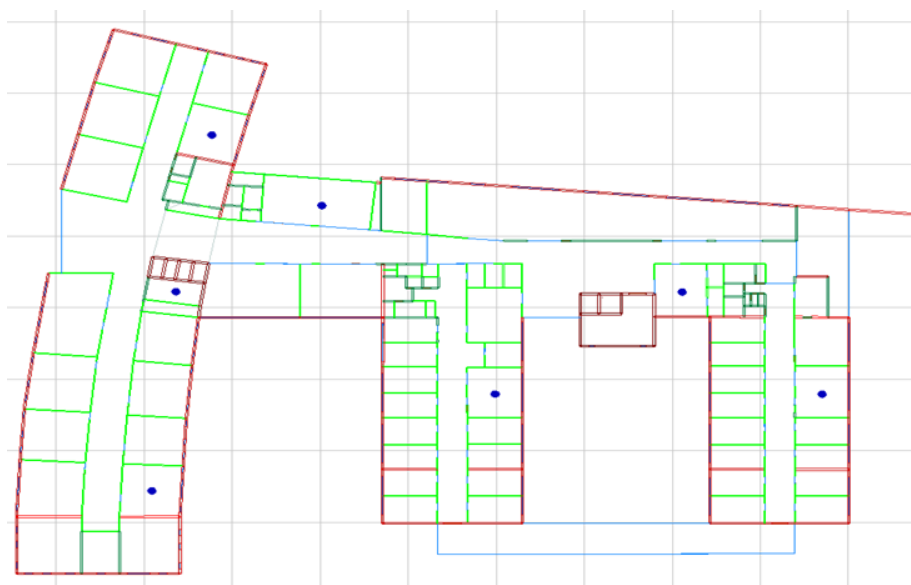
7.1 Umístění a konfigurace vysílacích bodů sítě

Pro konfiguraci a nastavení vysílačů pro simulaci bylo využito výpisu stavu reálné předlohy sítě. Tento výpis obsahuje informace o použitém modelu přístupového bodu, jeho komunikačním kanálu, vysílaném výkonu a místnosti, kde je vysílač umístěn (příloha C).

V budově je síť realizována dvěma modely směrovačů od společnosti Cisco o celkovém počtu 43 přístupových bodů. Konkrétně se jedná o modely Cisco Aironet LAP2602 [6] a Cisco Aironet LAP1242 [7]. Druhý jmenovaný model však tvoří pouze 2 konkrétní přístupové body v podzemním a pátém patře budovy. Každý tento fyzický směrovač vysílá na dvou frekvenčních pásmech, a to 2,4 GHz a 5 GHz. Umístění vysílacích bodů ve třetím podlaží budovy ilustruje obrázek 7.1. Umístění vysílacích bodů na všech podlažích budovy je uvedeno v příloze B.

Jelikož popis umístění přístupových bodů omezený na označení místnosti není přesný, všechny AP byly dány do středu příslušných místností. Většina přístupových bodů je rovněž fyzicky v budově umístěna ve stropním podhledu nad sádkartonovou příčkou. Tato příčka není zakreslena, souvisí to s omezeními tvorby modelu popsanými v kapitole 6.3.

Ve vysílacím pásmu 5 GHz mají přístupové body kanál a vysílací výkon, který se volí dynamicky s přepočtem co 24 hodin (komunikační kanál), respektive 10 minut (vysílací výkon). Vyhodnocení probíhá na straně kontroleru dynamicky dle rušení od okolí a vzájemného rušení mezi AP. Simulační program nedovoluje nastavit tyto parametry jako dynamické, tudíž je nastavena vždy středová hodnota vysílaného výkonu a nejnižší dostupný přepočítávaný kanál. Dynamický výkon lze v softwaru simulovat pouze pomocí statistické metody Monte Carlo (kapitola 10). Výsledné nastavení přístupových bodů v programu Wireless Insite popisuje příloha C.



Obrázek 7.1: Umístění přístupových bodů v třetím podlaží v softwaru Wireless Insite

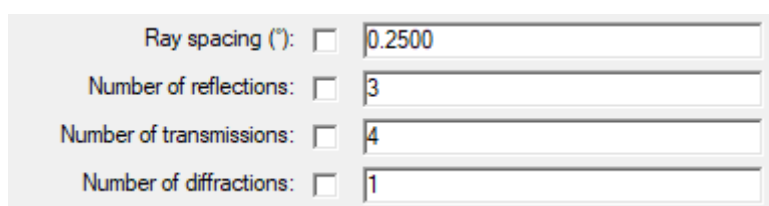
7.1.1 Vysílací a přijímací antény

Pro definování vysílací antény pro simulaci byl využit datasheet [6] společnosti Cisco pro daný směrovač. Na základě těchto údajů byla vytvořena všesměrová anténa s maximálním ziskem 4 dBi. Anténa má horizontální šířku záření 360 stupňů [6]. To odpovídá dodávané anténě, která je v zařízení přítomná.

Pro přijímače, respektive simulované body byla využita idealizovaná izotropická anténa. U této antény byl zisk nastaven na 0 dBi.

7.2 Nastavení parametrů simulace

Simulační engine X3D (kapitola 5.1) v programu Wireless Insite kalkuluje s několika uživatelsky upravitelnými parametry. Přehled těchto parametrů je uveden v obrázku 7.2. Při nastavení těchto parametrů byl brán zřetel zejména na výpočetní možnosti virtuálního počítače, na kterém simulace probíhala.



Ray spacing (°):	<input type="checkbox"/>	0.2500
Number of reflections:	<input type="checkbox"/>	3
Number of transmissions:	<input type="checkbox"/>	4
Number of diffractions:	<input type="checkbox"/>	1

Obrázek 7.2: *Parametry simulace*

Parametr Ray spacing je využíván během kalkulace trasování dráhy paprsku. Jedná se o prostorové oddělení vysílaných paprsků. Minimální hodnota představuje 0.05 stupňů, pro trasování na velké vzdálenosti (nad 500 x 500 metrů) se doporučuje minimálně hodnota 0,2 stupně [11]. Korektní nastavení tohoto parametru závisí tedy na velikosti simulované oblasti, ale také na velikosti překážek v projektu a jejich vzdálenosti od vysílače. V manuálu ani uživatelské příručce však není popis, jak by měla tato hodnota být jednoznačně vypočítána a zvolena. Pro simulace tedy byla využita hodnota 0,25 stupňů, což je výchozí hodnota nastavená softwarem.

Dalším parametrem je maximální počet počítaných reflexí (kapitola 2.1), kterou může vlna bez difrakce projít. Ve většině situací stačí, aby tento parametr nabýval hodnoty čísla 6, přesto ve specifických oblastech (úzké ulice) může být vyžadována hodnota vyšší [11]. Pro simulaci byla však zvolena hodnota 3 reflexí, jelikož tento parametr je velice náročný na výpočetní výkon a výsledný čas kalkulací.

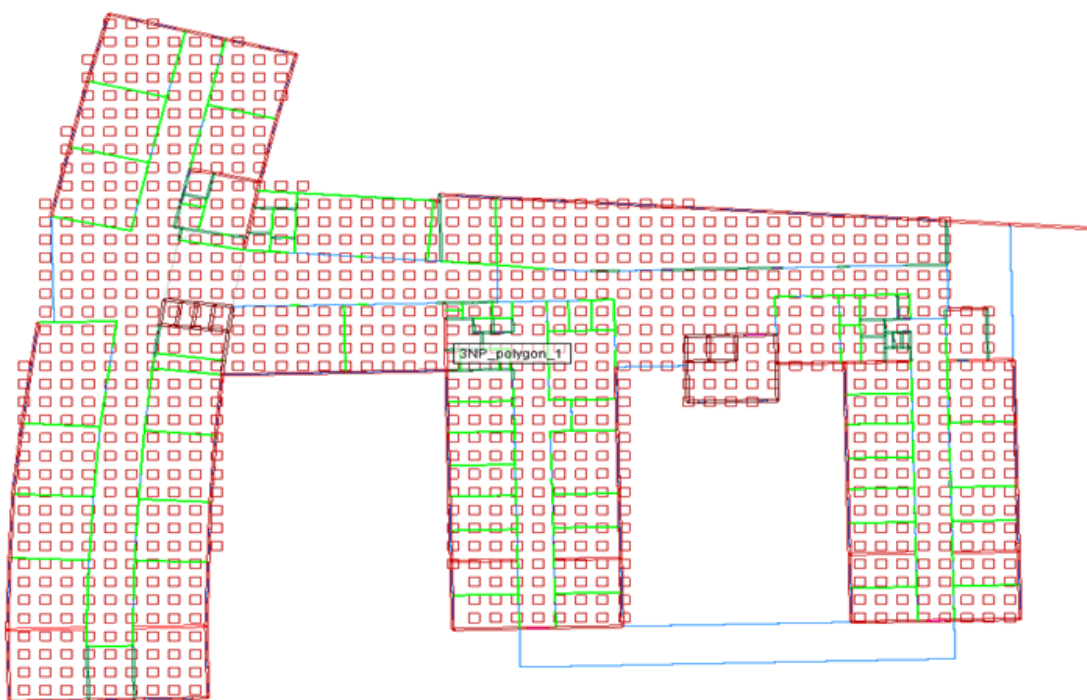
Maximální kalkulovaný počet paprsků, kterými se může vlna v jednom konkrétním směru bez difrakce šířit, byl nastaven celkem na 4. Jedná se o polovinu výchozí hodnoty. Tento parametr společně v součtu s počtem reflexí lze nastavit až na hodnotu 30.

Posledním upravovaným parametrem je kalkulovaná hodnota difrakcí (kapitola 2.2). Dle společnosti Remcom je optimální již 1 počítaná difrakce [11]. Tato hodnota byla tedy nastavena.

Software umožňuje tuto hodnotu nastavit až na hodnotu 3. Jedná se o nejnáročnější parametr z hlediska výpočetního výkonu, časovou náročnost kalkulací ovlivňuje téměř řádově.

7.3 Rozložení přijímacích bodů pro simulaci

Pro zaznamenání výsledků simulací bylo využito polygonové mřížky měřených bodů (přijímačů). Jednotlivé mřížky pokrývají vždy vnitřní části právě jednoho podlaží budovy. Každá výsledná simulovaná plocha pak má velikost 2 m^2 . Na této ploše je vždy zaznamenána unikátní přijímaná úroveň signálu od všech dílčích vysílacích přístupových bodů. Hodnota je vždy zapsána v jednotkách dBm a také převedena graficky do modelu. Pro výpočet simulací byl výsledný počet měřených bodů a jejich vzdálenost optimalizována tak, aby celková doba kalkulace simulace nepřesáhla přijatelný časový úsek. Celkový počet těchto měřených bodů v projektu je téměř 6000. Vizuální znázornění rozložení těchto bodů představuje obrázek číslo 7.3.



Obrázek 7.3: Znáornění rozložení přijímacích bodů ve třetím podlaží budovy

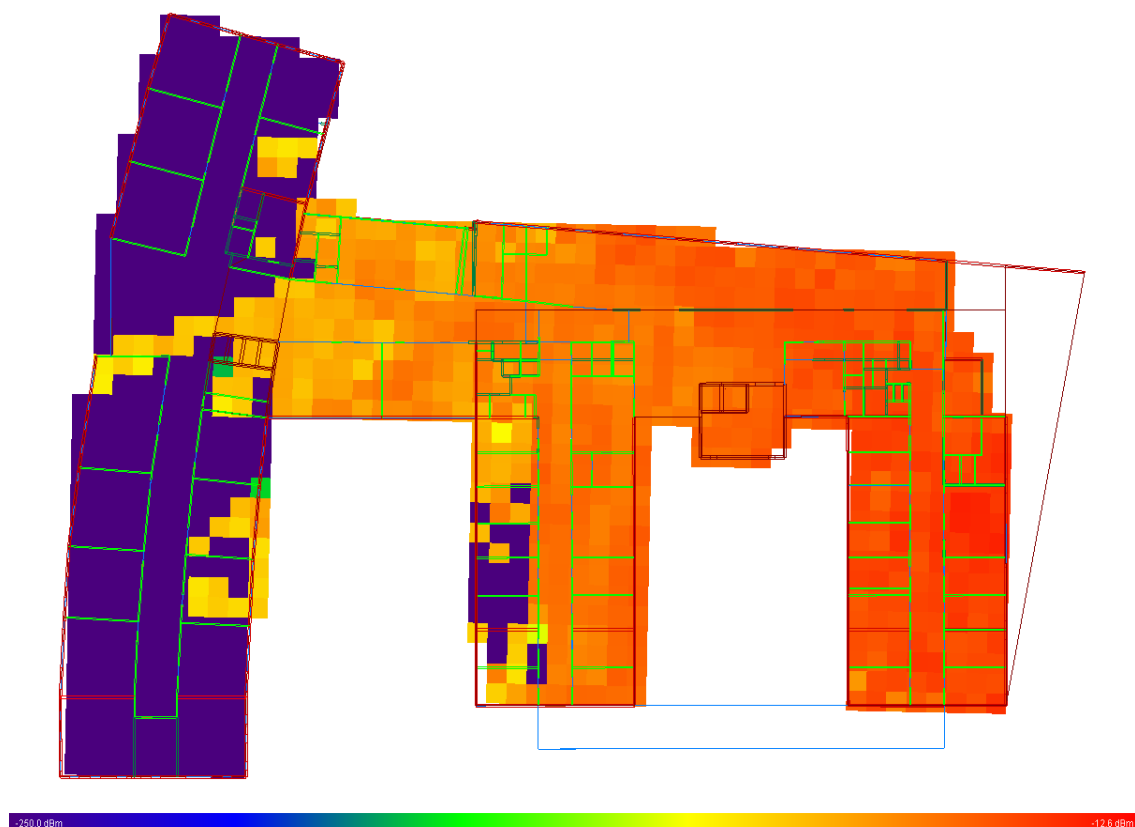
7.4 Výsledky simulací

Jak již bylo řečeno v kapitole 7.3, výsledky simulací pro každý AP v budově jsou dvojího charakteru. Jedná se vždy o grafické a číselné (tabulkové) vyjádření přijímané úrovně signálu. Tyto výsledky jsou vždy rozděleny pro obě vysílací pásma. Kompletní výsledky simulací podlaží jsou uvedeny v příloze G.

7.4.1 Pásmo 2,4 GHz

Z obrázku 7.4 je možno vypořadovat, že již jeden AP dokáže v pásmu 2,4 GHz pokrýt samostatně značnou část budovy. Ukázkový příklad mezních hodnot lze vidět v tabulce 7.1, která se shoduje s grafickým vyjádřením na obrázku 7.4. Je zde uvedena minimální úroveň přijímaného signálu, jeho průměrná úroveň, maximální a statistická směrodatná odchylka. Směrodatná odchylka určuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny či odchýleny od průměru hodnot. Jednoduše řečeno, směrodatná odchylka je průměrnou odchylkou od průměru hodnot [14].

Části budovy, kde neproběhla simulace, nejsou do těchto statistik započítávány. Minimální úroveň je tedy nejnižší hodnota, kde je hodnota odlišná od prahové hodnoty softwaru -250 dBm.



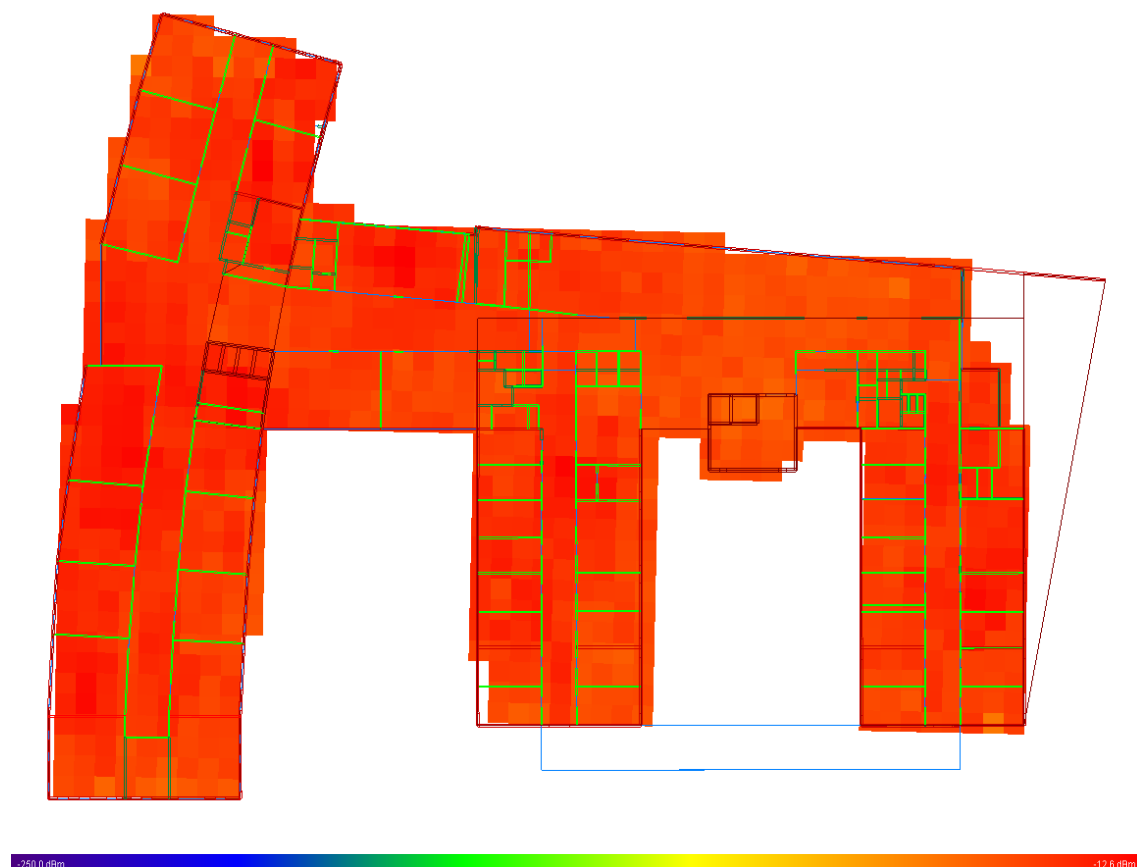
Obrázek 7.4: Ukázka vizuální simulace AP ve třetím podlaží budovy

Tabulka 7.1: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku 1.17

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-168	-58	-25	18

Dále se zde objevují osamocené simulované body, které vykazují přijímanou úroveň signálu, i když se kolem nich naopak žádný signál nevyskytuje. To lze přičíst vlastnostem simulačního softwaru a je třeba tyto body brát jako body orientační.

Při zobrazení celkového pokrytí signálem, které nám dohromady veškeré AP vytvoří, se ukazuje, že pokrytí budovy je zcela dostatečné, ne-li výborné. Celkové pokrytí vybraného podlaží demonstruje obrázek 7.4. Z číselných hodnot vyplývá, že pokrytí signálem teoreticky dostačuje pro nejvyšší možnou datovou propustnost, kterou dokáže komunikační standard a daný směrovač poskytnout (tabulka 7.2).



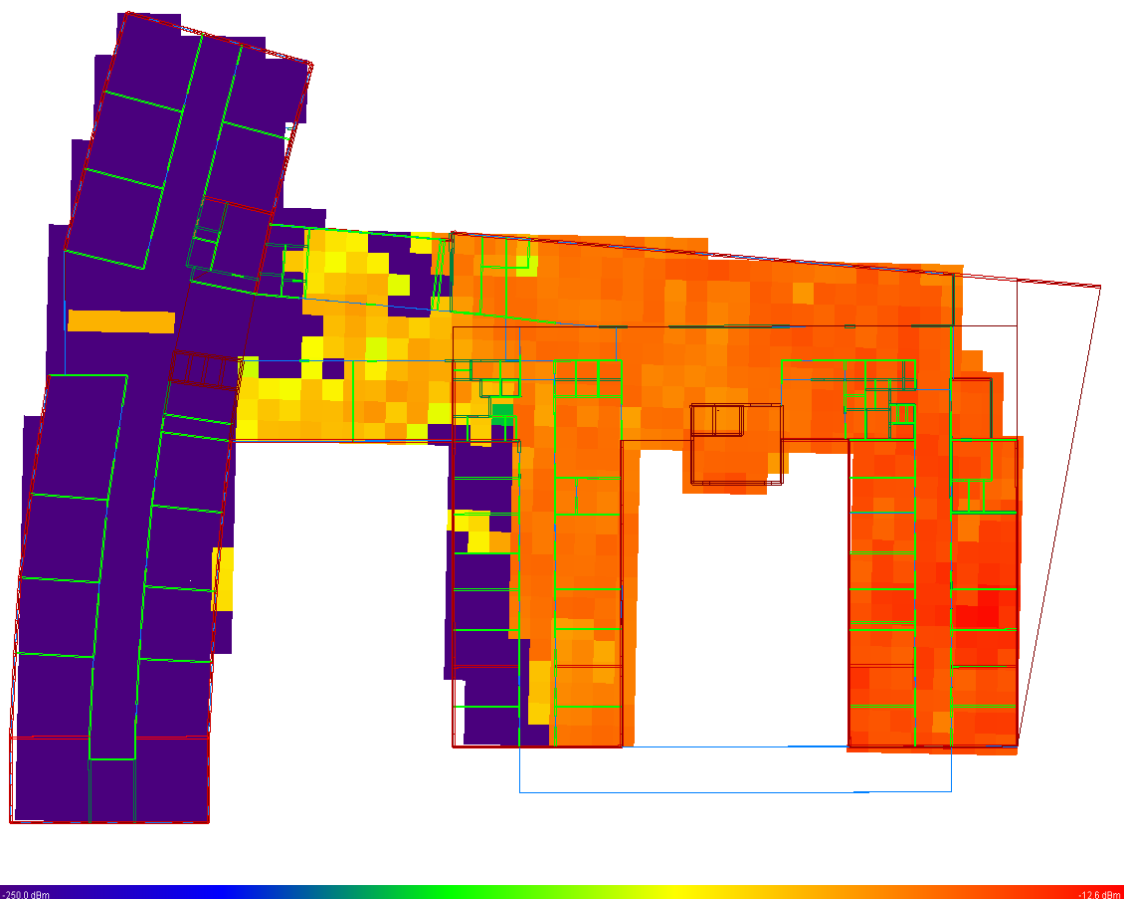
Obrázek 7.4: Ukázka vizuální simulace pokrytí signálem ve čtvrtém podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka 7.2: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku 7.4

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-60	-35	-17	13

7.4.2 Pásmo 5 GHz

Z obrázku 7.5 je pozorovatelné, že AP v tomto pásmu má menší pokrytí a dokáže tedy pokrýt menší plochu budovy se stejným počtem přístupových bodů. Je však třeba dodat, že menší pokrytí je částečně potlačeno v některých výsledcích simulací a kalkulacích provedených softwarem. Záleží zejména na konkrétním umístění daného vysílacího bodu.



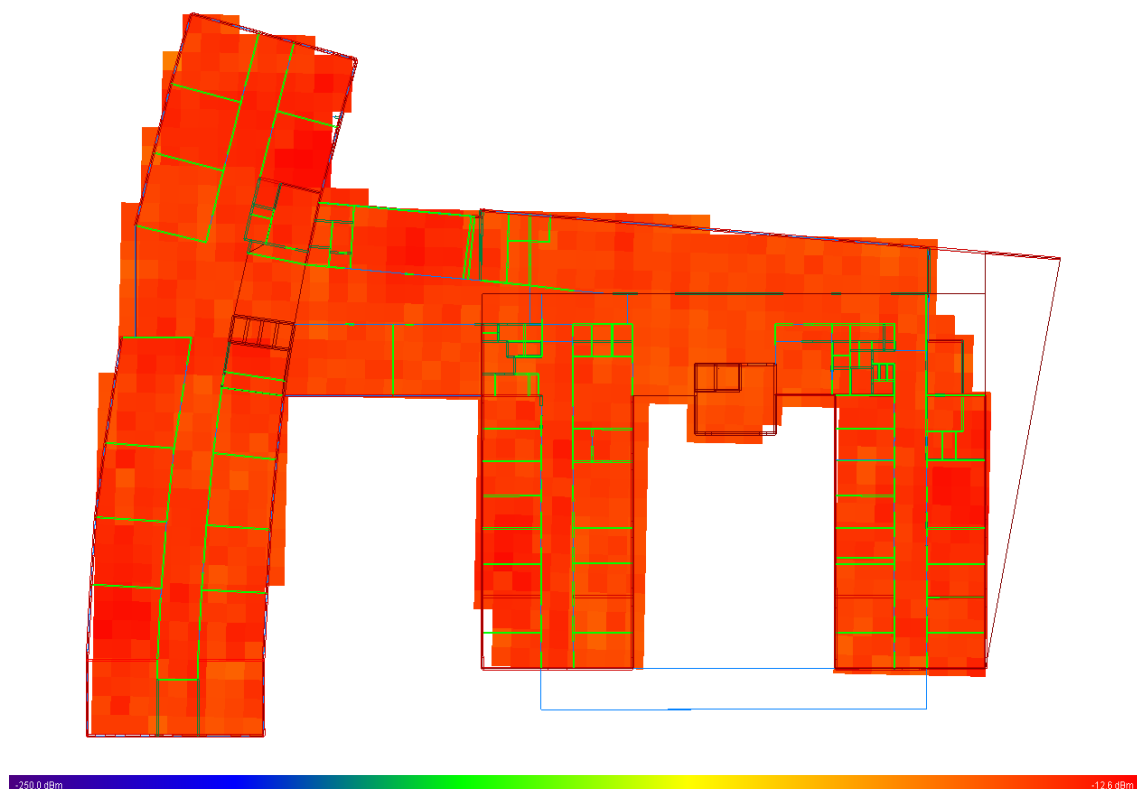
Obrázek 7.5: Ukázka vizuální simulace AP ve třetím podlaží budovy v pásmu 5 GHz

Ukázkový příklad číselných hodnot lze vidět v tabulce 7.3, která odpovídá vizuálnímu vyobrazení na obrázku 7.5.

Tabulka 7.3: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku 7.5

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-172	-62	-17	18

Při zobrazení celkového pokrytí signálem, které nám dohromady veškeré AP vytvoří se ukazuje, že pokrytí budovy je i zde zcela výborné i přesto, že nedosahuje průměrných úrovní pásma 2,4 GHz. Celkové pokrytí vybraného podlaží demonstruje obrázek 7.6 a dále tabulka 7.4.



Obrázek 7.6: Ukázka vizuální simulace pokrytí signálem ve čtvrtém podlaží v pásmu 5,0 GHz

Tabulka 7.4 Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku 7.6

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-60	-39	-20	6

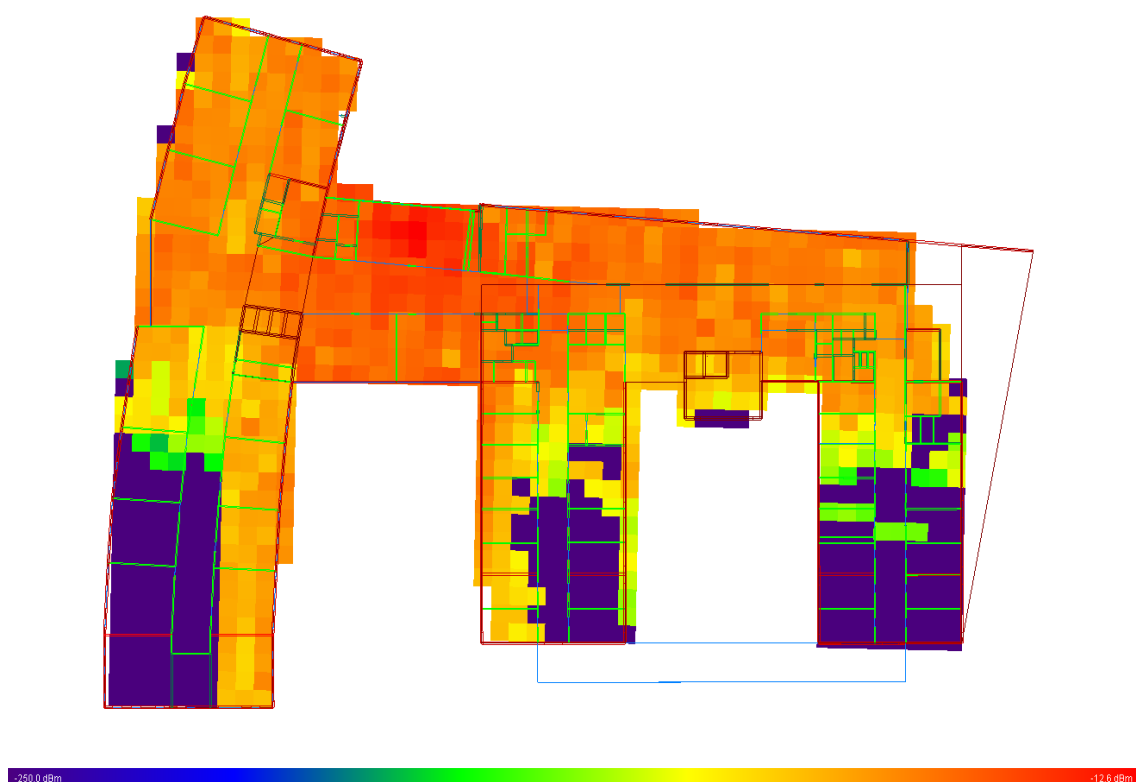
7.4.3 Rozdíl ve vysílacím výkonu

V pásmu 5 GHz u přístupových bodů s komunikačním kanálem 100 a výše je nastaven vyšší vysílací výkon (23 dBm), než v kanálech nižších (příloha C). V nich se využívá fixní vysílací výkon 18 dBm. Tento výkon je rovněž majoritním vysílacím výkonem napříč celým pásmem 2,4 GHz. Z tohoto důvodu byla provedena simulace, která měla za cíl ověřit přínos vyššího vysílacího výkonu v pásmu 5 GHz a srovnat, zda toto navýšení může kompenzovat nižší prostupnost a pokrytí signálu ve srovnání se sítí 2,4 GHz.

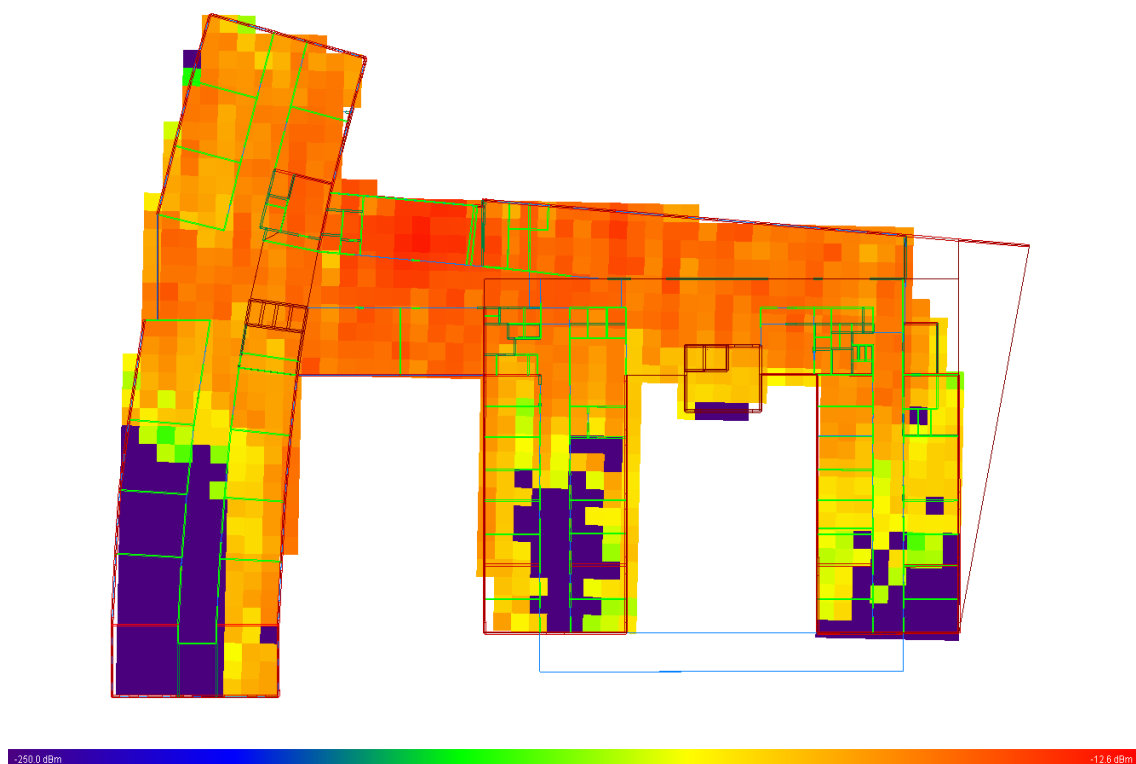
Na základě simulací lze vidět, že rozdíl 5 dB navyšuje dosah šířeného signálu v pásmu 5 GHz, a zároveň takový signál dosahuje stejného, či většího pokrytí než v pásmu 2,4 GHz, při vysílaném výkonu 18 dBm. Konkrétní případ ilustrují obrázky 7.7 a 7.8. Statistické vyjádření popisuje tabulka 7.5.

Tabulka 7.5: Statistické vyjádření úrovní signálů při rozdílném vysílacím výkonu

Komunikační pásmo [GHz]	Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
2,4 (18 dBm)	-182	-59	-19	17
5 (23 dBm)	-113	-58	-26	15



Obrázek 7.7: Vizualizace AP s vysílacím výkonem 18 dBm v pásmu 2,4 GHz



Obrázek 7.8: Vizualizace AP s vysílacím výkonem 23 dBm v pásmu 5 GHz

8 Ověření výsledků simulace měření

Na vybraných místech v budově byla zaznamenána úroveň přijímaného signálu vlastním měřením, jehož cílem bylo výsledky simulací ověřit a vzájemně porovnat.

8.1 Měřicí zařízení

Pro samotné měření byly využity čtyři konkrétní zařízení (tabulka 8.1). Jedná se o mobilní koncová zařízení (smartphone) a dále o jeden netbook (PC). Využitá měřicí zařízení odpovídají zařízením, která se ve školní bezdrátové síti zcela běžně nachází.

Tabulka 8.1: *Přehled využitých měřicích zařízení*

Název zařízení	Typ zařízení	Operační systém	Měřicí aplikace
iPhone 5	Smartphone	iOS 10.1	WiFi Analyzer
Sony Xperia Z1	Smartphone	Android 5.1	Network Signal Info
Xiaomi Mi 5	Smartphone	Android 8.0	Network Signal Info
Lenovo Miix 320	Netbook	Windows 10	WiSpy

U přístrojů Sony Xperia Z1 a Xiaomi Mi 5 bylo nutné zamezit ve využívání pásma 5 GHz, jelikož v tomto pásmu se měření neprovádělo a jako výchozí komunikační pásmo nastavit 2,4 GHz.

Jelikož každé zařízení má svůj operační systém, bylo nutné zvolit pro každý systém jinou aplikaci pro měření, kompatibilní s tímto zařízením a systémem. Vybrané aplikace jsou rovněž uvedeny v tabulce 8.1.

8.2 Metodika měření

Měření probíhalo ve veřejných prostorech budovy a v učebnách patřících pod Katedru telekomunikační techniky. Celkem bylo zvoleno 124 měřicích bodů, které jsou rovnoměrně rozloženy napříč všem podlažím. Rozložení těchto bodů v jednotlivých podlažích je uvedeno v příloze D. Na každém z těchto bodů došlo k uložení průměrné hodnoty přijímané úrovně. Tato průměrná úroveň je vypočtena z dílčích 10 hodnot, zaznamenaných na zařízení po dobu 10 sekund.

Jelikož při plném zastínění přímé viditelnosti mezi mobilním zařízením a AP dochází k poklesu přijímané úrovně signálu [13], bylo k identifikaci AP využito výpisu MAC adres. Na mobilním zařízení byla zjištěna MAC adresa AP, se kterým probíhá komunikace. Poté došlo k natočení mobilního zařízení přímou viditelností směrem k AP.

Držení daného typu zařízení v průběhu měření ilustruje obrázek číslo 8.1, kde zařízení typu smartphone se nachází vlevo, netbook vpravo.

Měření probíhalo ve dvou cyklech ve více dnech, kvůli časové náročnosti. Každý cyklus měl však společné časové rozpětí v rámci dne. Nejprve měření proběhlo v odpoledních hodinách

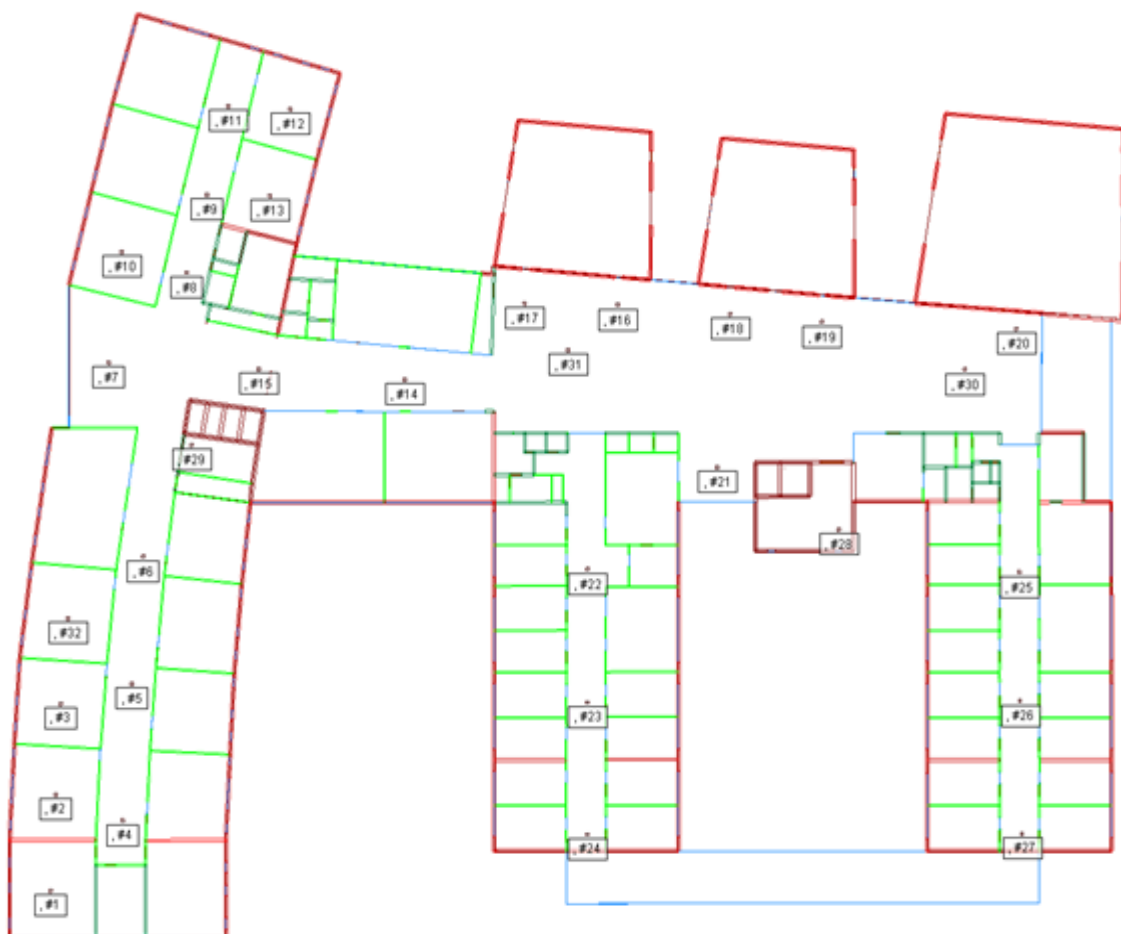
(14 hodin až 17 hodin), následně pak proběhlo identické měření ve večerních hodinách (17 hodin až 20 hodin).



Obrázek 8.1: *Způsob držení zařízení v průběhu měření*

8.3 Výsledky měření

Ukázka výsledků měření v odpoledních hodinách v druhém podlaží budovy je uvedena v tabulce 8.1. Umístění měřících bodů ilustruje obrázek 8.2. Kompletní výsledky měření ve všech podlažích budovy a časech jsou uvedeny v příloze E.



Obrázek 8.2: *Rozložení měřených bodů ve druhém podlaží budovy*

Tabulka 8.1: Ukázka výsledků měření úrovně ve druhém podlaží v odpoledních hodinách

Měřený bod	iPhone 5 [dBm]	Odchylka simulace [dB]	Sony Xperia Z1 [dBm]	Odchylka simulace [dB]	Xiaomi Mi 5 [dBm]	Odchylka simulace [dB]	Lenovo Miix 320 [dBm]	Odchylka simulace [dB]
1	-48	9	-51	12	-50	11	-53	14
2	-46	8	-49	11	-48	10	-52	14
3	-50	13	-55	18	-51	14	-54	17
4	-56	19	-54	17	-52	15	-59	22
5	-55	22	-41	8	-50	17	-56	23
28	-50	13	-59	22	-59	22	-44	7
29	-50	12	-51	13	-54	16	-52	14
30	-53	10	-56	13	-51	8	-52	9
31	-52	17	-56	21	-53	18	-43	8
32	-52	15	-55	18	-53	16	-54	17
Průměr	-51	14	-52	15	-51	14	-51	14

Výsledky z měření ukazují, že přijímaná úroveň signálu je v jakémkoliv měřeném bodě nižší, než je hodnota vypočtená simulací. Rozdíl mezi simulací a koncovým zařízením je průměrně roven 14 dB. Zároveň je pozorovatelné, že zařízení se navzájem v průměrných výsledcích neliší, avšak často je mezi nimi značná odchylka v jednotlivých měřeních.

Ukázka zaznamenaných hodnot úrovní signálu z druhého identického měření ve večerních hodinách je uvedeno v tabulce 8.2.

Tabulka 8.2: Ukázka výsledků měření úrovně ve druhém podlaží ve večerních hodinách

Měřený bod	iPhone 5 [dBm]	Odchylka simulace [dB]	Sony Xperia Z1 [dBm]	Odchylka simulace [dB]	Xiaomi Mi 5 [dBm]	Odchylka simulace [dB]	Lenovo Miix 320 [dBm]	Odchylka simulace [dB]
1	-48	9	-45	6	-50	11	-52	13
2	-48	10	-56	18	-51	13	-48	10
3	-45	8	-48	11	-51	14	-53	16
4	-49	12	-49	12	-43	6	-41	4
5	-41	8	-58	25	-51	18	-47	14
28	-56	19	-47	10	-48	11	-56	19
29	-57	19	-48	10	-54	16	-56	18
30	-44	1	-56	13	-56	13	-46	3
31	-48	13	-53	18	-52	17	-49	14
32	-47	10	-52	15	-44	7	-40	3
Průměr	-49	12	-50	12	-50	13	-49	11

Z výsledků vyplývá, že rozdíl mezi odpoledními a večerními hodinami je v průměru zanedbatelný i přesto, že v odpoledních hodinách je v budově větší koncentrace osob a síť je oproti večerním hodinám více zatížená. Vysoké odchylky však nejsou opět jen mezi jednotlivými

zařízeními v daném měřeném bodě navzájem, ale také se vyskytují při porovnání dílčích měřených bodů mezi odpoledními a večerními hodinami.

8.3.1 Měření úrovně signálu v čase

Na základě výsledků měření v jednotlivých částech budovy bylo provedeno dodatečné měření, které mělo za cíl porovnat dílčí hodnoty přijímané za delší časový úsek na jednom místě. Pro toto měření byl použit smartphone iPhone 5, který byl položen v místnosti EB315 na stůl a se zařízením se nijak nemanipulovalo. Měření na tomto zařízení probíhalo po dobu 50 sekund, přičemž prvních 10 sekund a posledních 10 sekund bylo z výsledků odstraněno, z důvodů interakce s přístrojem a případným stíněním vlastním tělem (zahajování měření, ukončování měření). Výsledky měření úrovně signálu v čase jsou uvedeny v příloze F.

Tabulka 8.3: Ukázka výsledků měření úrovně signálu v čase

Čas měření [s]	Úroveň [dBm]	Úroveň [dBm]	Úroveň [dBm]
1	-56	-43	-46
2	-50	-49	-43
3	-55	-48	-58
4	-48	-53	-49
27	-49	-44	-59
28	-44	-44	-45
29	-57	-60	-46
30	-46	-42	-51
Minimum	-41	-42	-42
Průměr	-49	-52	-51
Maximum	-60	-61	-60

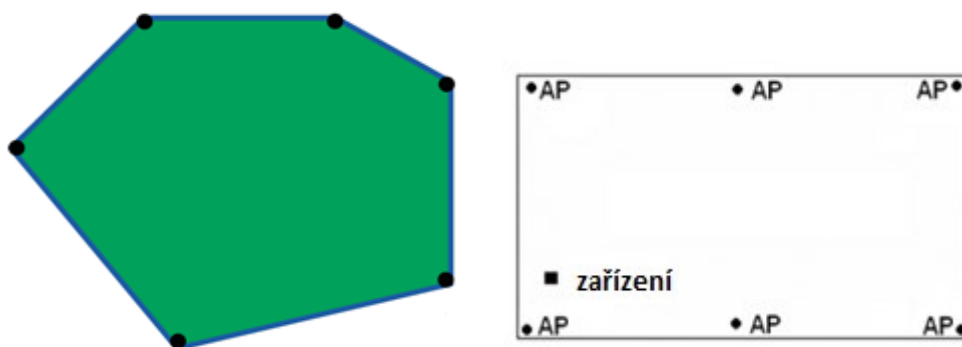
Z měření úrovně signálu v čase (tabulka 8.3) lze pozorovat její výraznou kolísavost. Odchylka mezi průměrnou hodnotou a jejím maximem či minimem je přibližně 10 dB. Simulace v programu Wireless Insite v daném místě vykazuje hodnotu -39 dBm. Pokud bychom uvažovali o minimální, tedy nejlepší hodnotě, kterou koncové zařízení dokáže zachytit, rozdíl mezi simulací a vlastním měřením se výrazně sníží. V tomto konkrétním případě se pak jedná o rozdíl o hodnotě -2 dB až -3 dB. Tyto výkyvy v úrovni signálu se vyskytovaly ve všech provedených měřeních.

9 Návrh optimalizace sítě z hlediska pokrytí signálem

9.1 Návrh optimalizace pomocí redukce AP

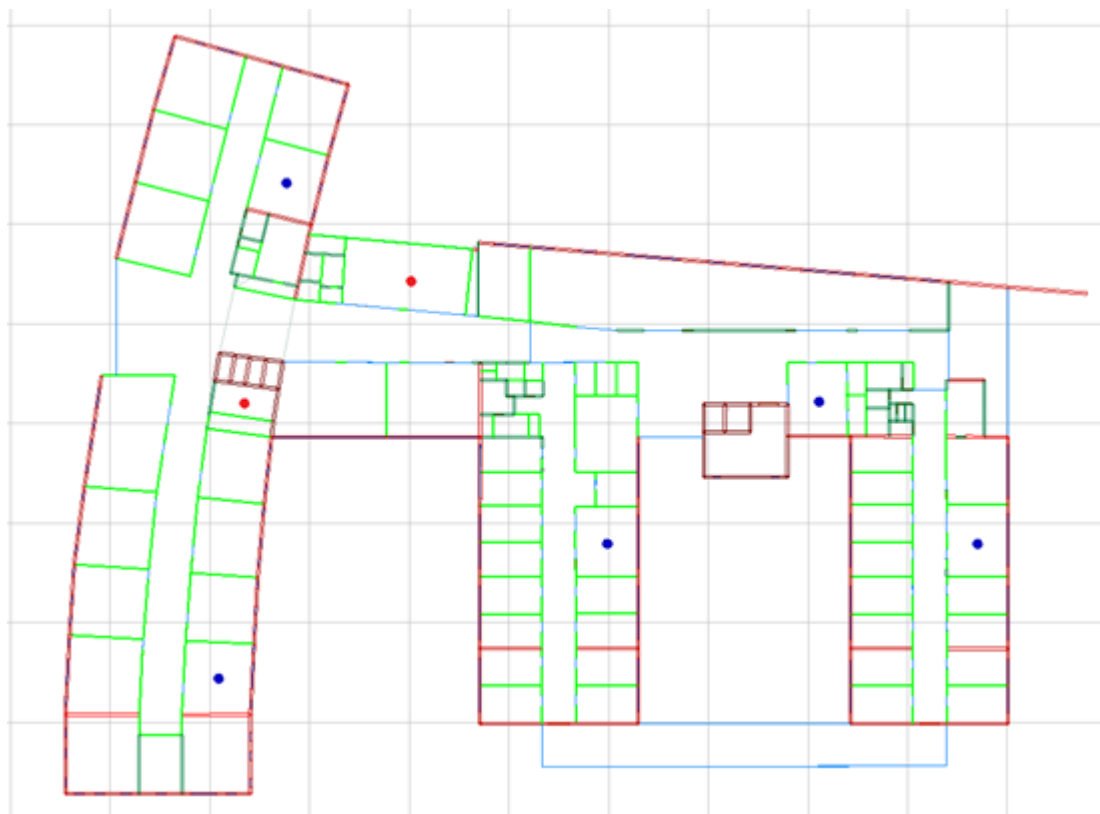
Jelikož z výsledků simulací vychází zcela zřejmé stoprocentní pokrytí budovy signálem, optimalizaci je třeba vést počtem redukování stávajících přístupových bodů, či optimalizací jejich nastavení. Základní koncept optimálního rozmístění přístupových bodů dle doporučení firmy Cisco již byl popsán v kapitole 3.3. Na základě tohoto konceptu byla navržena daná optimalizace.

Výsledky simulací poukázaly na fakt, že dosah obvodových přístupových bodů dosahuje středu podlaží, proto dokáží pokrýt podlaží bez dodatečných přístupových bodů umístěných blíže středu. Při převedení na koncept konvexního trupu tvaru sítě vyjde síť znázorněná na obrázku 9.1.



Obrázek 9.1: *Koncept navrženého rozložení přístupových bodů v podlaží*

Druhým důležitým výstupem simulací je zjištění, že prostupnost signálu mezi patry je velice značná i v pásmu 5 GHz. Zbylé obvodové přístupové body tedy byly redukovány tak, aby byly vždy vzájemně umístěny na stejné pozici pouze v každém druhém podlaží. Výsledný počet bodů se tímto způsobem zredukoval ze 43 na 25. Znázornění rozložení přístupových bodů v třetím podlaží ilustruje obrázek 9.2, kde jsou redukované přístupové body zobrazeny červeně. Optimalizace ostatních podlaží je uvedena v příloze D.



Obrázek 9.2: *Optimalizace rozložení přístupových bodů v třetím podlaží*

Při návrhu optimalizace byl brán v potaz také praktický dopad pro případnou realizaci daného návrhu. V rámci simulačního softwaru lze přístupové body umisťovat bez omezení kamkoliv. V praktickém prostředí to však nemusí být vždy uskutečnitelné, jelikož přístupové body nemohou být technicky umístěny na danou pozici. Nevyhovovaly by estetické požadavky, nebo instalace a vedení kabeláže na dané místo by byla velice obtížná. Tyto faktory se nedají ze zjednodušeného simulačního modelu budovy odhadnout či určit. Druhý faktor představují finanční a technické náklady přestavění a přenastavení architektury fungující sítě v plném provozu. Stávající síť navíc správně dodržuje doporučené minimální vzdálenosti od firmy Cisco mezi AP [9]. Návrh tedy již umístěné obvodové přístupové body nijak nepřesunuje, ponechává je ve stavu reálné předlohy sítě stávající.

Za doporučenou minimální úroveň signálu pro komunikaci bez znatelného omezení můžeme pokládat úroveň -70 dBm [8]. Pro konkrétní použité typy směrovačů Cisco Aironet LAP2602 [6] a Cisco Aironet LAP1242 [7] by tato hodnota teoreticky stále poskytla maximální možnou datovou propustnost ve všech podporovaných doplňcích. Plošné pokrytí touto úrovní však samozřejmě vždy nemusí být cílem, jelikož oblasti jako schodiště a podobně nepodléhají prioritě dostupnosti služby.

Návrh optimalizace také musí podléhat platné legislativě dle Českého telekomunikačního úřadu uvedené v příloze A.

Vzhledem k tomu, že síť pracující v pásmu 2,4 GHz má z povahy navržené metodiky a na základě nasimulovaných výsledků nižší nároky na optimalizaci, výchozím pásmem pro návrh optimalizace se stala předloha sítě pracující v pásmu 5 GHz.

9.1.1 Vliv pracovního kanálu na šíření signálu

V kapitole 7.4.3 je uvedeno, že pracovní kanály 100 a výše v pásmu 5 GHz mají nastaven vyšší vysílací výkon než pracovní kanály nižší. To má za cíl kompenzovat teoretickou horší prostupnost vyšších pracovních kanálů, respektive jejich vyšších pracovních frekvencí. Tímto způsobem lze sjednotit (případně rozšířit) oblast pokrytí příslušných AP napříč pásmem.

Na základě provedeného testování v simulačním softwaru Wireless Insite má však vliv pracovního kanálu velmi omezený účinek na pokrytím signálem. Průměrná úroveň se liší v desetinách dBm, dosah pokrytí AP v simulaci je zcela totožný. Číselné výsledky simulací jednoho AP s fixním vysílacím výkonem 18 dBm, avšak odlišnými pracovními kanály zobrazuje tabulka 9.1.

Tabulka 9.1: *Porovnání úrovní signálů napříč pracovními kanály*

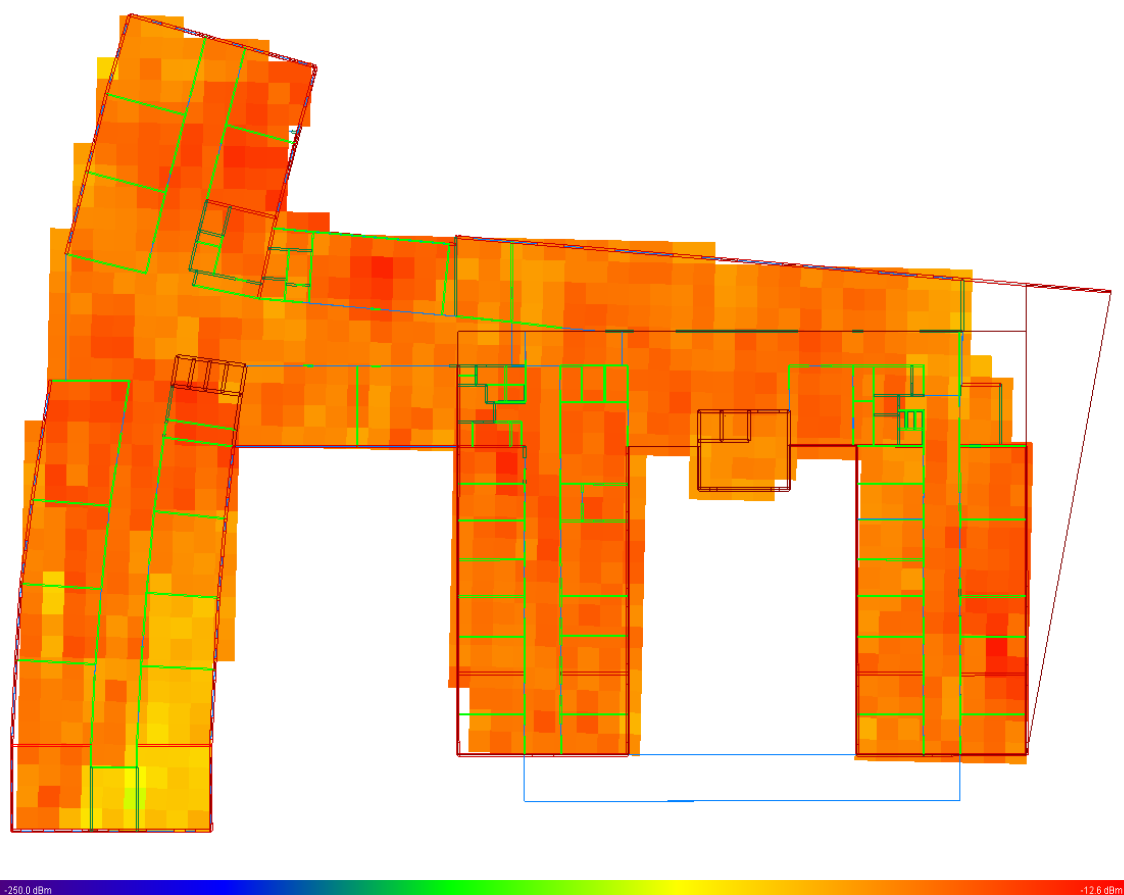
Komunikační pásmo [GHz]	Číslo pracovního kanál	Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
2,4	1	-171	-57	-22	16
2,4	11	-174	-57	-18	17
5	36	-171	-64	-35	17
5	132	-169	-65	-36	16

Z hlediska optimalizace pokrytí signálem se tedy jeví zvolený pracovní kanál jako zanedbatelný a dá se říci, že výsledné pokrytí signálem ovlivňuje zejména výběr komunikačního pásma a jeho vysílací výkon.

9.2 Výsledky navržené optimalizace

9.2.1 Pásmo 5 GHz

Výsledky navržené optimalizace vykazují stále plné pokrytí celé budovy. Průměrné a minimální úrovně přijímaného signálu jsou ovšem po redukci počtu AP nižší. To na vybraném podlaží ilustruje obrázek 9.3 a tabulka 9.2.



Obrázek 9.3: Vizuální simulace pokrytí signálem v pásmu 5 GHz

Tabulka 9.2: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku 1.24

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-73	-44	-20	7

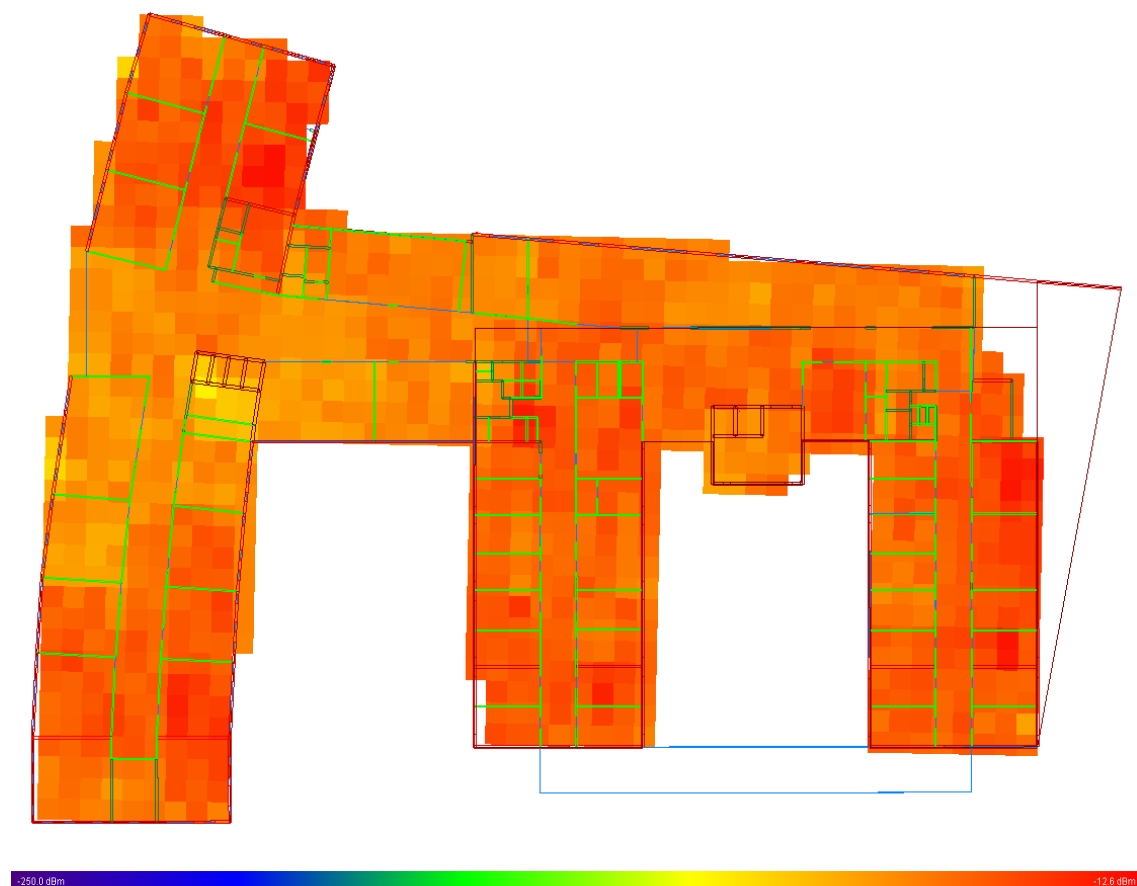
Při porovnání s neoptimalizovanou sítí v rámci stejného podlaží (tabulka 9.3) vychází větší rozdíl v rámci minimální úrovně. Tato úroveň je hraniční pro dosažení teoretické maximální datové propustnosti.

Tabulka 9.3: Porovnání úrovní signálů ve čtvrtém podlaží budovy

Předloha sítě (5 GHz)	Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
Původní	-60	-39	-20	6
Optimalizovaná	-73	-44	-20	7

9.2.2 Pásmo 2,4 GHz

Výsledky optimalizace v pásmu 2,4 GHz se od pásma 5 GHz liší v úrovních přijímaného signálu (tabulka 9.4), pokrytí signálem je však stále stoprocentní (obrázek 9.4).



Obrázek 9.4: Vizuální simulace pokrytí signálem v pásmu 5 GHz

Tabulka 9.4: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku 9.4

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-67	-38	-18	7

Při opětovném porovnání s neoptimalizovanou sítí v rámci stejného podlaží (tabulka 9.5) vychází, že síť operující v pásmu 2,4 GHz vykazuje vyšší hodnoty přijímané úrovně signálu. To odpovídá výsledkům dosažených v rámci simulace sítě stávající popsané v kapitole 7.4.

Kompletní výsledky optimalizace pomocí redukce počtu AP jsou uvedeny v příloze H.

Tabulka 9.5 Porovnání úrovní signálů ve čtvrtém podlaží budovy

Předloha sítě (2,4 GHz)	Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
Původní	-60	-35	-17	13
Optimalizovaná	-67	-38	-18	7

9.2.3 Navržená optimalizace a její možný negativní dopad na síť

Samotná optimalizace rozložení pokrytí budovy signálem však nemusí nutně znamenat zlepšení kvality připojení. Redukce přístupových bodů uvolňuje pásmo pro využití více kanálů a snižuje riziko vzájemného rušení. Zároveň ale také automaticky zvyšuje nároky na zbývající přístupové body sítě. Nárůst zatížení pro tyto AP může být znatelný zejména v prostředí s vysokým počtem současně připojených klientů.

Druhým prvkem je samotný fakt, že přijímaná úroveň signálu zcela jednoznačně nevypovídá o konečných dosažitelných přenosových rychlostech a konečné kvalitě připojení. Již zmiňované okolní rušení v daném pásmu a vzájemné překrývání kanálů stále hraje velice důležitou roli. Tato problematika je popsána v kapitole 3.3.

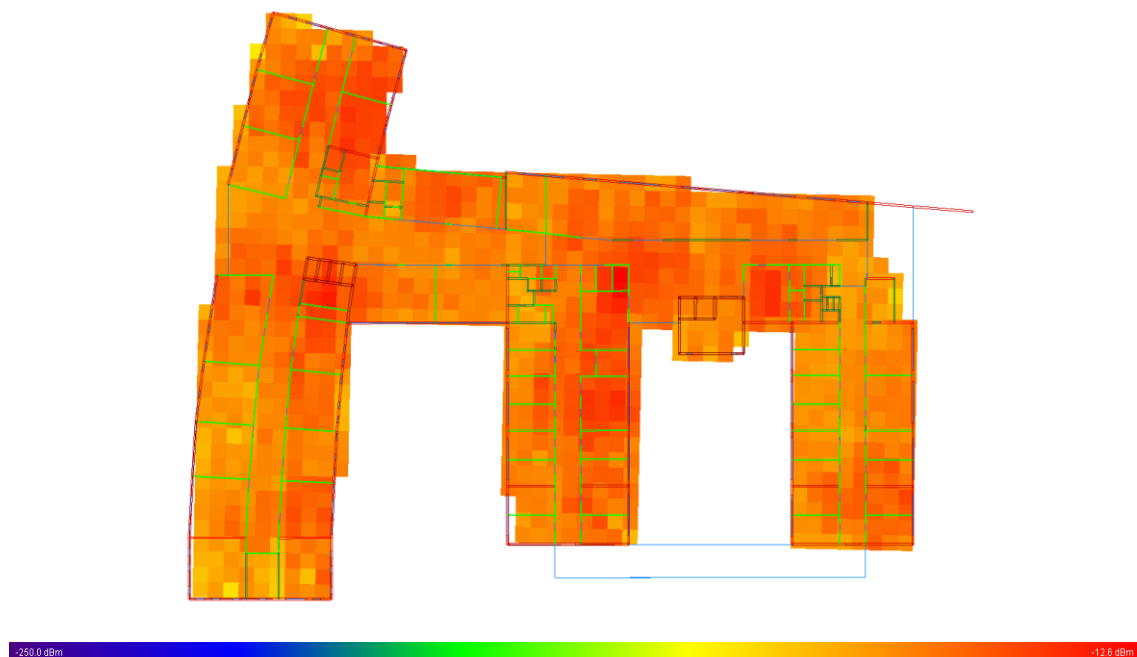
9.3 Návrh optimalizace pomocí redukce výkonu

Druhým návrhem pro možnou optimalizaci je ponechat stávající rozložení a počet přístupových bodů, avšak snížit jim vysílaný výkon. Pro optimalizaci byla na základě testování sítě v simulačním softwaru Wireless Insite zvolena hodnota vysílaného výkonu 12 dBm pro všechna AP a pásma.

9.4 Výsledky navržené optimalizace

9.4.1 Pásmo 5 GHz

Výsledky optimalizace pomocí redukce vysílaného výkonu na 12 dBm ukazují velice obdobné hodnoty, jako v případě předešlé optimalizace pomocí redukce přístupových bodů. Výsledky vybraného podlaží popisuje obrázek 9.6 a tabulka 9.6.



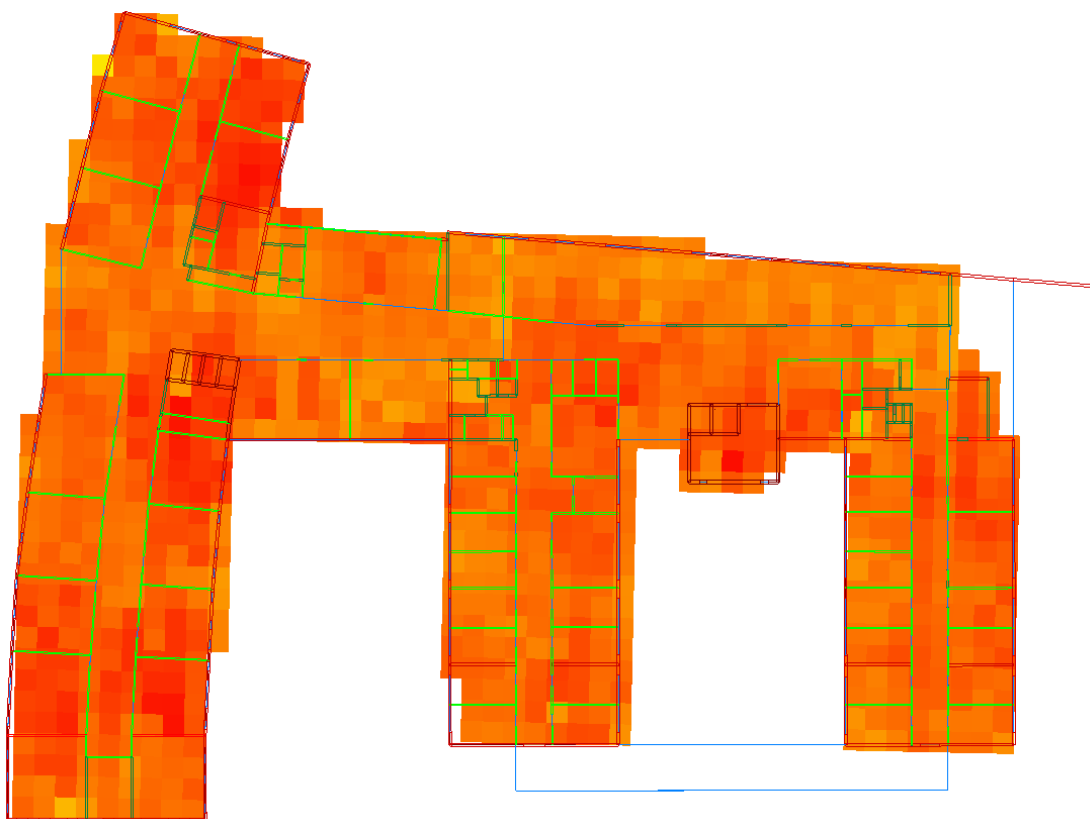
Obrázek 9.6: Vizuální simulace pokrytí signálem v pásmu 5 GHz při výkonu 12 dBm

Tabulka 9.6: *Porovnání úrovní signálů ve čtvrtém podlaží budovy*

Předloha sítě (5 GHz)	Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
Původní	-60	-39	-20	6
Optimalizovaná	-73	-42	-20	7

9.4.2 Pásmo 2,4 GHz

Rovněž výsledky optimalizace v pásmu 2,4 GHz jsou velice obdobné, jako při optimalizaci pomocí redukce přístupových bodů (obrázek 9.7 a tabulka 9.7).



Obrázek 9.7: *Vizuální simulace pokrytí signálem v pásmu 2,4 GHz při výkonu 12 dBm*

Tabulka 1.1: Tabulka 9.7: *Porovnání úrovní signálů ve čtvrtém podlaží budovy*

Předloha sítě (2,4 GHz)	Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
Původní	-60	-35	-17	13
Optimalizovaná	-65	-38	-18	6

Kompletní výsledky optimalizace pomocí redukce vysílaného výkonu jsou uvedeny v příloze I.

9.5 Navržené optimalizace a jejich vztah s naměřenými výsledky

Na základě měření provedeného v kapitole 8.4 lze usuzovat, že simulace vykazuje vyšší hodnoty přijímané úrovně signálu, než s jakými koncová zařízení v budově reálně pracují. Tuto odchylku je tedy nutno zohlednit při posuzování výsledků optimalizace.

Obě navržené optimalizace stále vykazují hodnoty výrazně vyšší nad minimální hodnotu pro dosažení maximální datové propustnosti. Je však třeba počítat s nižší hodnotou úrovně signálu na koncových zařízeních, která se projevila ve vlastním měření (kapitola 8). Odchylka mezi měřením a simulací v jednotlivých podlažích se v závislosti na zařízení pochybuje mezi 9 dB až 15 dB.

9.6 Alternativní návrhy optimalizací

Návrhů pro potenciální optimalizaci je však mnohem více a mnohé z nich se dají vzájemně kombinovat.

Za možné řešení do budoucna můžeme považovat i nástup klientských zařízení podporující standard 802.11ad. Tento standard komunikující v pásmu 60 GHz nabízí nejen vysoké teoretické přenosové rychlosti, ale jelikož jeho signál nepronikne většinou konstrukčních pevných překážek v zástavbách, naprosto tak eliminuje problematiku vzájemného překrývání kanálů. Umístění takovýchto přístupových bodů do místností s vysokou prioritou pokrytí signálem může být rovněž v budoucnu zvažováno a postupně v reálném prostředí stále častěji nasazováno.

Dále by se dalo uvažovat o využití směrových či sektorových antén zejména pro přístupové body, které se nachází na okraji budovy. Využitím těchto antén by se rovněž dal redukovat výsledný počet přístupových bodů.

10 Možnosti rozšíření práce

10.1 Simulace dynamického vysílaného výkonu

Jak bylo uvedeno v kapitole 5, Wireless Insite kalkuluje simulaci dynamického vysílaného výkonu pomocí statistické metody Monte Carlo. Jelikož je tato simulační metoda časově velice náročná vzhledem k výpočetnímu výkonu počítače, na kterém simulace probíhaly, pro simulace byl vždy stanoven fixní vysílaný výkon.

Všechny algoritmy založené na metodě Monte Carlo mají jedno společné, a to výpočet založený na mnohokrát opakovaných náhodných pokusech (odhadech náhodné veličiny). Odhady hledané veličiny se získávají statistickou cestou a mají tedy pravděpodobnostní charakter.

Samotný výsledek má pak vždy povahu statistického charakteru. Z toho tedy vyplývá, že požadované přesnosti můžeme dosáhnout vždy zvyšováním počtu náhodných pokusů. To však může vést k velké časové náročnosti, proto je vždy potřeba hledat optimalizace algoritmu pro dosažení dostatečné přesnosti při zachování rozumného počtu opakování [14].

Parametry pro kalkulaci (kapitola 7.2) by se rovněž daly navýšit na hodnoty doporučené v manuálu, za účelem zvýšení přesnosti výsledných simulací.

Vzhledem k tomu, že výsledný model budovy a kompletní bezdrátová síť je již v simulačním softwaru nakonfigurována, tyto úpravy jsou velice minimální. Pro všechna popsaná rozšíření je však třeba využít výkonný počítač, který má vlastní dedikovanou grafickou kartu pro akcelerované výpočty (podpora Nvidia CUDA), jelikož tato rozšíření nejsou vhodná pro výpočty přes samotný procesor.

10.2 Rozšíření vlastního měření

Jelikož měření jednotlivých podlaží budovy je velice časově náročné, práce by se dala rozšířit o dodatečná měření. Za jedno z možných přínosných rozšíření v této kapitole lze považovat provedené měření datové propustnosti sítě na klientských zařízeních. Díky tomu, že se jedná o velice kritický faktor pro koncové uživatele, získané výsledky by se poté daly porovnat a navázat je na již uvedené výsledky měření přijímané úrovně signálu. Získanými výsledky o datové propustnosti by se tedy rozšířila analýza chování sítě v budově.

Rozšíření popsaná v této kapitole by se dala například uvést jako námět na budoucí bakalářskou práci.

Závěr

Modelování a simulace bezdrátových sítí mohou poskytnout cenné informace a náhled do jejich fungování. Softwarová simulace však nikdy zcela nezachytí přesný stav sítě a je třeba počítat s určitými omezeními a zjednodušeními.

Velice důležitým se stává simulační software samotný a jeho schopnosti a přesnost s jakou dokáže bezdrátovou síť simulovat. V rámci této práce, kde byl využit software Wireless Insite se vyskytla omezení, která simulační výsledky zkreslují. Jedná se zejména o nemožnost kreslení oblých tvarů a omezená databáze materiálů, kterou má software pro simulaci definovanou.

Z povahy fyzikálních vlastností radiofrekvenčních vln se také simulace potýkají s proměnným prostředím v čase. Výslednou přijímanou úroveň tedy nemusí ovlivňovat pouze osoby zastihující přímou viditelnost mezi AP a koncovým zařízením, ale i vlastnosti simulovaného prostředí, jako například vlhkost či teplota vzduchu [11] mohou způsobovat odchylky. Dále se v této práci jedná o simulaci prázdné budovy, bez pevného či občasné i pohyblivého inventáře a jejího vybavení. V reálném prostředí se mohou vyskytovat i vysílače jiných sítí, se kterými návrh a simulace vůbec nepočítá. Takové vysílače mohou být umístěny v blízkém okolí nebo přímo v dané zástavbě. Typickým příkladem může být nově zapojená tiskárna, která ve výchozím nastavení může vysílat v pásmu 2,4 GHz, na kanále číslo 6 o šířce 40 MHz. V případě budovy FEI jsou v některých podlažích umístěna dodatečná AP, která slouží pro studenty k výuce. Tyto nadbytečné přístupové body mohou způsobovat rušení sítě a následně degradaci datové propustnosti, a tedy z pohledu uživatele nejdůležitější parametr sítě.

Ověřování stávajících bezdrátových sítí ve vícepodlažních budovách pomocí měření úrovně signálu je časově velice náročný úkol. Při měření pomocí klientských zařízení je třeba se navíc potýkat s jejich různorodou citlivostí přijímačů a vysokou fluktuací přijímané úrovně signálu v čase. Klientská zařízení navíc mohou podporovat pouze omezené množství doplňků standardu 802.11 a pouze některá komunikační pásma, což může redukovat možnosti proměření sítě. Typickým příkladem je stále poněkud omezená adaptace komunikačního pásma 5 GHz v mobilních zařízeních. Je tedy téměř nemožné počítat se všemi kombinacemi uživatelských zařízení a je nutné uvažovat o vzorku typických klientských zařízení, které danou síť využívají.

I přes orientační povahu výsledků simulací a měření je možno na základě výsledků této práce konstatovat, že bezdrátová síť v budově FEI splňuje veškeré požadavky na minimální přijímanou úroveň signálu a jejího pokrytí. Simulace dokládají, že budova je plně pokryta signálem Wi-Fi. Ve vytvořeném modelu budovy a stávající sítě lze jednoznačně vidět rovnoměrné rozložení přístupových bodů z hlediska prostoru a podlaží. Dále je zde vidět optimální rozložení kanálů, kdy AP ve vzájemné přímé blízkosti nemají nikdy společný pracovní kanál, aby se předcházelo jejich vzájemnému překrývání. Síť je tedy z těchto hledisek profesionálně navržena. Navržené optimalizace v této práci mohou poté snížit finanční náklady na provoz této sítě při zachování teoretických maximálních datových propustností a stále plného pokrytí v celé budově.

Použitá literatura

- [1] Informační společnost v číslech 2017 [online]. 2017 [cit. 2018-03-27] Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/10180/46014808/061004-17_S.pdf/b9a0a83e-7a6f-4613-b1df-33fe8b5d1a8e
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN-80-214-1868-0
- [3] Pechač P., Zvánovec S.: Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů, BEN, 2007, ISBN: 978-80-7300-223-7
- [4] PERAHIA, Eldad a Robert STACEY. Next generation wireless LANs: 802.11n, 802.11ac, and Wi-Fi direct. Second edition. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-1-107-01676-7
- [5] KOVÁČIK, Petr. Monitorování sítí Wi-Fi [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/108798>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [6] Cisco Aironet 2600 Series Access Point [online]. 2014 [cit. 2018-03-04] Dostupné z: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-2600-series/data_sheet_c78-709514.pdf
- [7] Cisco Aironet 1240 Series Access Point [online]. 2009 [cit. 2018-03-04] Dostupné z: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/collaboration-endpoints/unified-ip-phone-7900-series/product_data_sheet0900aecd8031c844.pdf
- [8] Wireless LAN Design Guide [online]. 2017 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/industries/docs/education/cisco_wlan_design_guide.pdf
- [9] Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide [online]. 2008 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/WiFiLBS-DG.pdf>
- [10] LÁZNÍČKOVÁ, Alice. Základy fyzikální chemie: vybrané kapitoly pro posluchače farmaceutické fakulty. Praha: Karolinum, 2001. Učební texty Univerzity Karlovy v Praze. ISBN 80-246-0220-2
- [11] Wireless InSite Reference Manual: Version 2.8.0. State College, PA 16801, October 2015.
- [12] TRULOVE, James. Sítě LAN: hardware, instalace a zapojení. Praha: Grada, 2009. Profesionál. ISBN 978-80-247-2098-2
- [13] PATER, Michael. Vliv umístění mobilního zařízení na příjem signálu [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/119002>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

- [14] FABIAN, František a Zdeněk KLUIBER. Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění. Praha: Prospektrum, 1998. ISBN 80-7175-058-1

Seznam příloh

Příloha A:	Podmínky k provozování zařízení v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz.....	58
Příloha B:	Umístění vysílacích bodů v budově.....	62
Příloha C:	Tabulka přístupových bodů v budově FEI.....	65
Příloha D:	Optimalizace počtu vysílacích bodů v budově.....	66
Příloha E:	Výsledky měření přijímané úrovně signálu.....	71
Příloha F:	Výsledky měření přijímané úrovně signálu na stejném místě.....	86
Příloha G:	Výsledky simulací pokrytí signálem v podlažích.....	87
Příloha H:	Výsledky optimalizace pomocí redukce přístupových bodů.....	99
Příloha I:	Výsledky optimalizace pomocí redukce vysílacího výkonu.....	111



Č e s k ý t e l e k o m u n i k a č n í ú ř a d

se sídlem Sokolovská 219, Praha 9
poštovní přihrádka 02, 225 02 Praha 025

Praha 29. září 2010
Čj. 98 973/2010-613

Český telekomunikační úřad (dále jen „Úřad“) jako příslušný orgán státní správy podle § 108 odst. 1 písm. b) zákona č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o elektronických komunikacích), ve znění pozdějších předpisů (dále jen „zákon“), a zákona č. 500/2004 Sb., správní řád, ve znění pozdějších předpisů, na základě výsledků veřejné konzultace uskutečněné podle § 130 zákona, rozhodnutí Rady Úřadu podle § 107 odst. 8 písm. b) bod 2 a k provedení § 9 a 12 zákona vydává opatřením obecné povahy

všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz.

Článek 1 Úvodní ustanovení

Podmínky provozování přístrojů¹⁾,²⁾ vztahující se na využívání rádiových kmitočtů a provozování vysílacích rádiových zařízení pro širokopásmový přenos dat³⁾ (dále jen „stanice“) fyzickými nebo právnickými osobami stanoví zákon a toto všeobecné oprávnění podle § 10 odst. 1 zákona.⁴⁾

Článek 2 Konkrétní podmínky

Konkrétní podmínky týkající se § 10 odst. 1 písm. n) zákona jsou:

- a) stanici lze provozovat bez individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů;

¹⁾ § 73 až 75 zákona.

²⁾ ČSN ETSI EN 300 328 – Elektromagnetická kompatibilita a rádiové spektrum (ERM) – Širokopásmové přenosové systémy – Zařízení pro přenos dat pracující v pásmu ISM 2,4 GHz a používající techniky modulace s rozprostřeným spektrem.

ČSN ETSI EN 301 893 – Širokopásmové rádiové přístupové sítě (BRAN) – Vysokovýkonná RLAN 5 GHz – Harmonizovaná EN pokrývající základní požadavky článku 3.2 Směrnice R&TTE.

ČSN ETSI EN 302 567 – Širokopásmové rádiové přístupové sítě (BRAN) – Systémy WAS/RLAN pracující při přenosových rychlostech násobku gigabitů v pásmu 60 GHz.

³⁾ OFDM – ortogonální modulace s vícenásobným frekvenčním dělením (Orthogonal Frequency Division Multiplex).

⁴⁾ Toto všeobecné oprávnění vychází z doporučení Evropského radiokomunikačního výboru (dále jen „ERC“) Evropské konference poštovních a telekomunikačních správ (dále jen „CEPT“) č. CEPT/ERC/REC 70-03 – Užívání zařízení s krátkým dosahem, verze z 1. června 2010 [Relating to the use of Short Range Devices (SRD)] a z rozhodnutí Evropské komise č. 2010/368/EU ze dne 30. června 2010, kterým se mění rozhodnutí 2006/771/ES o harmonizaci rádiového spektra pro zařízení krátkého dosahu.

b) technické parametry stanic jsou:

Ozn.	Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon	Maximální spektrální hustota e.i.r.p.	Další podmínky
a	2400,0–2483,5 MHz	100 mW e.i.r.p. ²⁾	10 mW/1 MHz	systémy s technikou DSSS ⁵⁾ nebo OFDM ³⁾
			100 mW/100 kHz	systémy s technikou FHSS ⁶⁾
b	5150–5250 MHz	200 mW střední e.i.r.p. ²⁾ , ⁷⁾	10 mW/MHz (střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)	pouze pro použití uvnitř budovy ⁸⁾
c	5250–5350 MHz	200 mW střední e.i.r.p. ²⁾ , ⁷⁾	10 mW/MHz (střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)	pouze pro použití uvnitř budovy ⁸⁾
d	5470–5725 MHz	1 W střední e.i.r.p. ²⁾ , ⁷⁾	50 mW/MHz (střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)	—
e	17,1–17,3 GHz	100 mW střední e.i.r.p. ⁷⁾	—	—
f	57–66 GHz	40 dBm střední e.i.r.p. ⁷⁾	13 dBm/MHz (střední spektrální hustota)	Stálé venkovní instalace jsou vyloučeny

- c) stanice musí dodržet maximální vyzářený výkon e.i.r.p. a maximální střední spektrální hustotu při libovolné kombinaci výstupního výkonu vysílače a použité antény;
- d) stanice nesmějí být provozovány s přídatnými zesilovači vysokofrekvenčního výkonu a s převaděči;
- e) stanice v pásmech c a d musí být vybaveny automatickou regulací výkonu, která průměrně poskytuje činitel potlačení rušení alespoň 3 dB oproti maximálnímu povolenému výstupnímu výkonu uvedených systémů. Není-li automatická regulace výkonu použita, snižuje se maximální povolený střední e.i.r.p. a odpovídající mez střední hustoty e.i.r.p. pro pásma c a d o 3 dB;
- f) v pásmech c, d a f musí být použity techniky přístupu ke spektru a zmírnění rušení, které poskytují přinejmenším rovnocenný účinek jako techniky popsané v harmonizovaných normách⁹⁾. Technologie potlačení rušení v pásmech c a d musí vyrovnávat pravděpodobnost výběru konkrétního kanálu ze všech dostupných kanálů, aby se v průměru zajistilo rovnoměrné rozptřeni zátěže spektra a aby byl zajištěn provoz slučitelný se systémy rádiového určování;
- g) stanice jsou provozovány na sdílených kmitočtech;
- h) provoz stanice nemá zajištěnu ochranu proti rušení způsobenému vysílacími rádiovými stanicemi jiné radiokomunikační služby provozovanými na základě individuálního oprávnění k využívání rádiových kmitočtů nebo jinými stanicemi pro širokopásmový

⁵⁾ DSSS – Systém rozptřeniho spektra s přímou sekvencí (Direct Sequence Spread Spectrum).

⁶⁾ FHSS – Systém rozptřeniho spektra s přeskokem kmitočtu (Frequency Hopping Spread Spectrum).

⁷⁾ Střední ekvivalentní izotropicky vyzářený výkon (e.i.r.p.) je výkon po dobu vysílání, který odpovídá nejvyššímu výkonu, pokud je použita regulace výkonu.

⁸⁾ „Použitím uvnitř budovy“ se rozumí jak použití uvnitř budovy, tak na místech podobných, například v letadle, kde stínění zpravidla poskytne potřebný útlum umožňující sdílení s jinými službami.

⁹⁾ Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů; Nařízení vlády č. 426/2000 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na rádiová a na telekomunikační koncová zařízení, ve znění pozdějších předpisů.

přenos dat. Případné rušení řeší fyzické a právnické osoby vzájemnou dohodou. Nedohodnou-li se, postupuje se podle § 100 zákona, případně zastaví provoz ten uživatel, který uvedl do provozu stanici způsobující rušení později;

- i) stanice nesmí být elektricky ani mechanicky měněna.

Článek 3

Závěrečné ustanovení

Za stanici, která splňuje požadavky dané nařízením vlády č. 426/2000 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na rádiová a na telekomunikační koncová zařízení, ve znění pozdějších předpisů, se považuje rovněž stanice, u které Úřad rozhodl o schválení rádiového zařízení podle § 10 zákona č. 151/2000 Sb., o telekomunikacích a o změně dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, pokud tato stanice byla uvedena na trh před dnem 1. dubna 2003.

Článek 4

Zrušovací ustanovení

Zrušuje se všeobecné oprávnění č. VO-R/12/06.2010-9 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat na principu rozprostřeného spektra nebo OFDM v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz ze dne 2. června 2010, zveřejněné v částce 11/2010 Telekomunikačního věstníku.

Článek 5

Účinnost

Toto všeobecné oprávnění nabývá účinnosti patnáctým dnem ode dne uveřejnění v Telekomunikačním věstníku.

Odůvodnění

Úřad vydává k provedení § 9 a § 12 zákona všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz.

Všeobecné oprávnění vychází z principů zakotvených v zákoně, z kmitočtových plánů a harmonizačních záměrů Evropských společenství a nahrazuje všeobecné oprávnění č. VO-R/12/06.2010-9 zrušené článkem 4 všeobecného oprávnění.

V článku 2 jsou uvedeny podmínky provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz. Tyto podmínky vycházejí z rozhodnutí Evropské konference poštovních a telekomunikačních správ (CEPT), zejména z doporučení CEPT ERC/REC 70-03 – Užívání zařízení s krátkým dosahem, ze směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 1999/5/ES, o rádiových zařízeních a telekomunikačních koncových zařízeních a vzájemném uznávání jejich shody, z rozhodnutí Evropské komise 2010/368/EU ze dne 30. června 2010, kterým se mění rozhodnutí 2006/771/ES, o harmonizaci rádiového spektra pro zařízení krátkého dosahu, jakož i z požadavků vyplývajících z výkonu správy rádiového spektra.

Po vydání všeobecného oprávnění č. VO-R/12/06.2010-9 vydala Evropská komise výše uvedené rozhodnutí 2010/368/EU. Evropský radiokomunikační výbor dále vydal dne 1. června 2010 aktualizovanou verzi výše uvedeného doporučení CEPT ERC/REC 70-03. Za účelem implementace tohoto rozhodnutí a doporučení provedl Úřad ve smyslu § 12 zákona v tomto všeobecném oprávnění následující změnu v tabulce v článku 2 písm. b) pásmo *f* oproti všeobecnému oprávnění č. VO-R/12/06.2010-9: Vyzářený výkon byl stanoven jednotně na 40 dBm střední e.i.r.p., střední spektrální hustota 13 dBm/MHz bez ohledu na to, zda jde o použití uvnitř či vně budovy. V souvislosti s tím bylo využití technologie potlačení rušení v čl. 2 písm. f) rozšířeno i na pásmo *f*.

Článek 3 stanoví možnost provozu zařízení uvedených na trh před dnem 1. dubna 2003.

Článek 4 zrušuje všeobecné oprávnění č. VO-R/12/06.2010-9.

Článek 5 stanoví účinnost všeobecného oprávnění podle § 124 odst. 2 zákona.

Na základě § 130 zákona a podle Pravidel Českého telekomunikačního úřadu pro vedení konzultací na diskusním místě Úřad zveřejnil dne 16. srpna 2010 návrh opatření obecné povahy, kterým se vydává všeobecné oprávnění č. VO-R/12/XX.2010-Y k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz, a výzvu k podávání připomínek na diskusním místě.

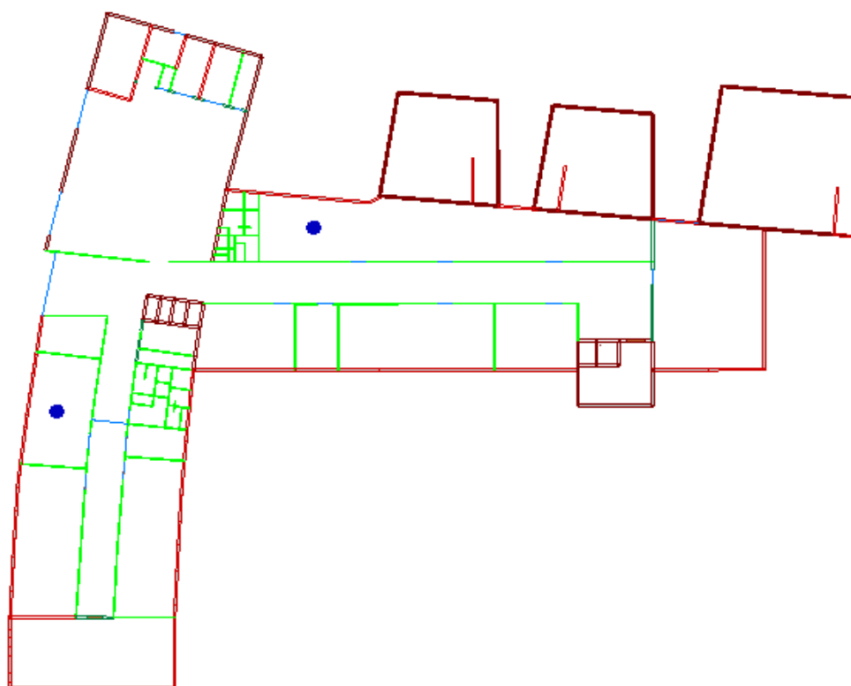
V rámci veřejné konzultace Úřad neobdržel žádnou připomínku.



za Radu Českého telekomunikačního úřadu:
Ing. Jana Fürstová
členka Rady
Českého telekomunikačního úřadu

Příloha B: *Umístění vysílacích bodů v budově*

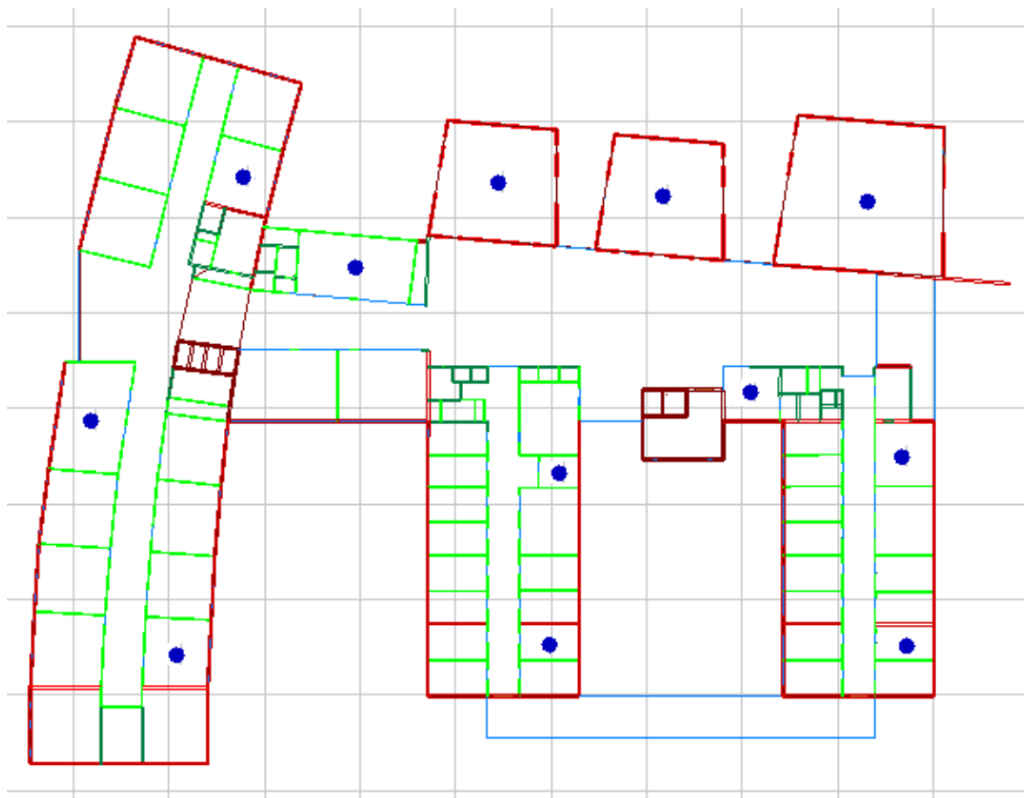
Obrázek B.1: *Umístění vysílacích bodů v podzemním podlaží*



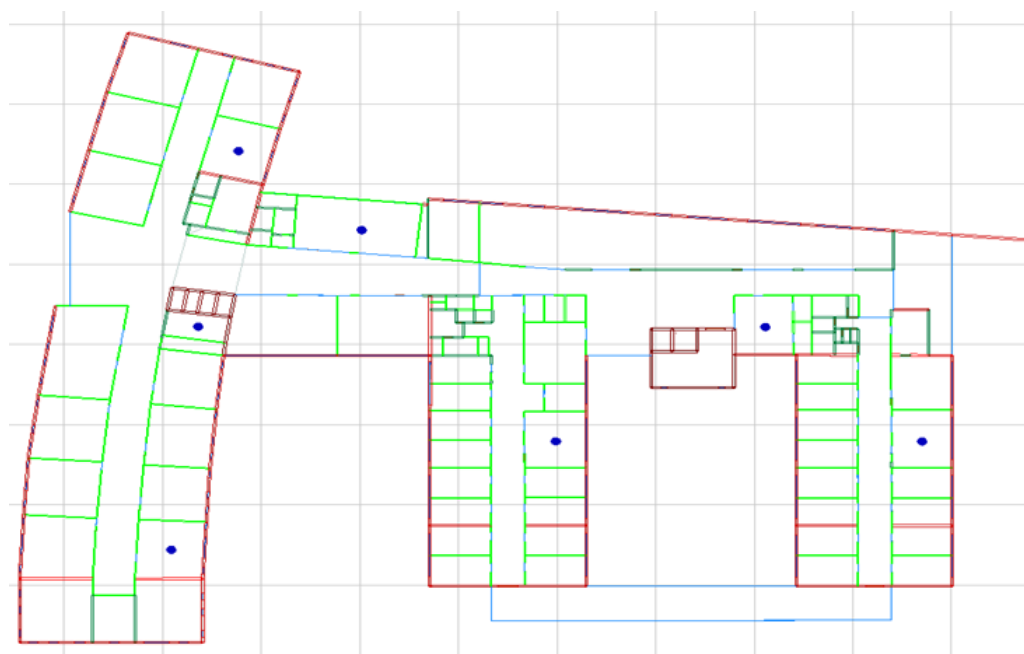
Obrázek B.2: *Umístění vysílacích bodů v prvním podlaží*



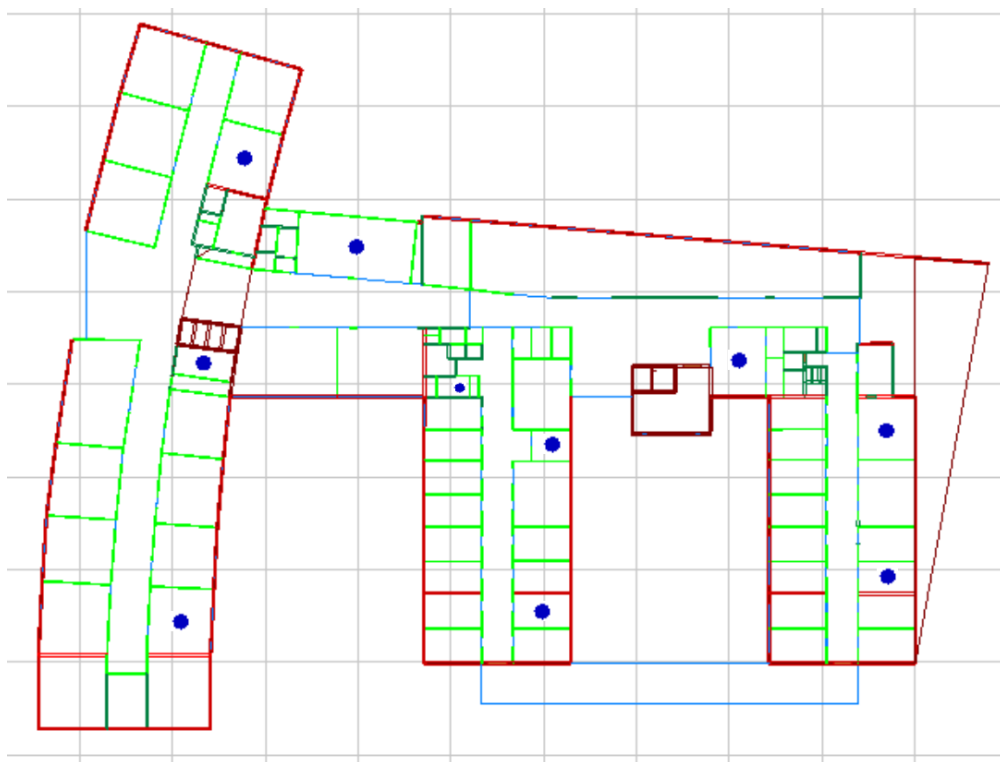
Obrázek B.3: *Umístění vysílacích bodů ve druhém podlaží*



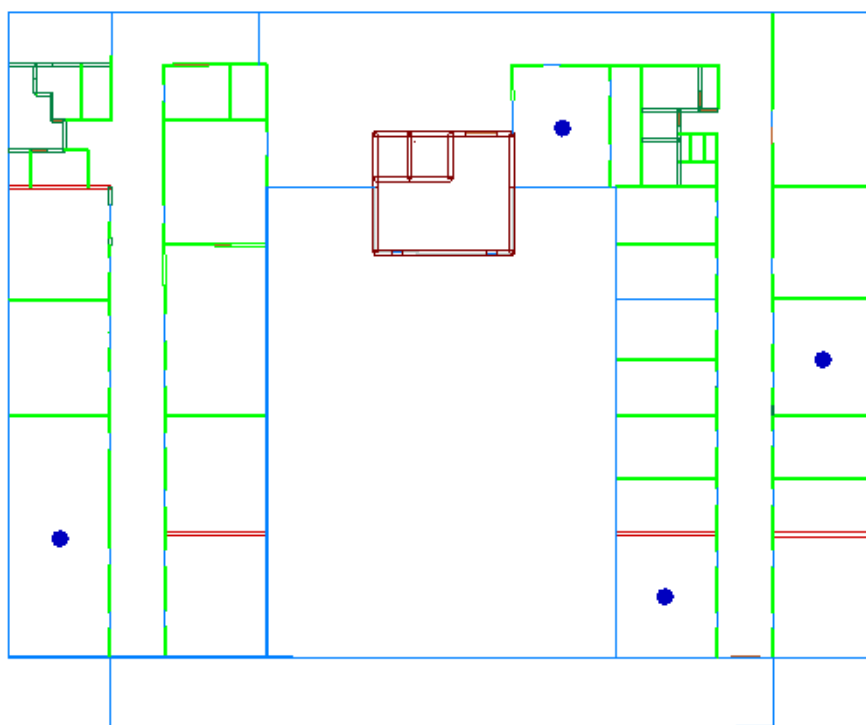
Obrázek B.4: *Umístění vysílacích bodů ve třetím podlaží*



Obrázek B.5: *Umístění vysílacích bodů ve čtvrtém podlaží*



Obrázek B.5: *Umístění vysílacích bodů v pátém podlaží*



Příloha C: *Tabulka přístupových bodů v budově FEI*

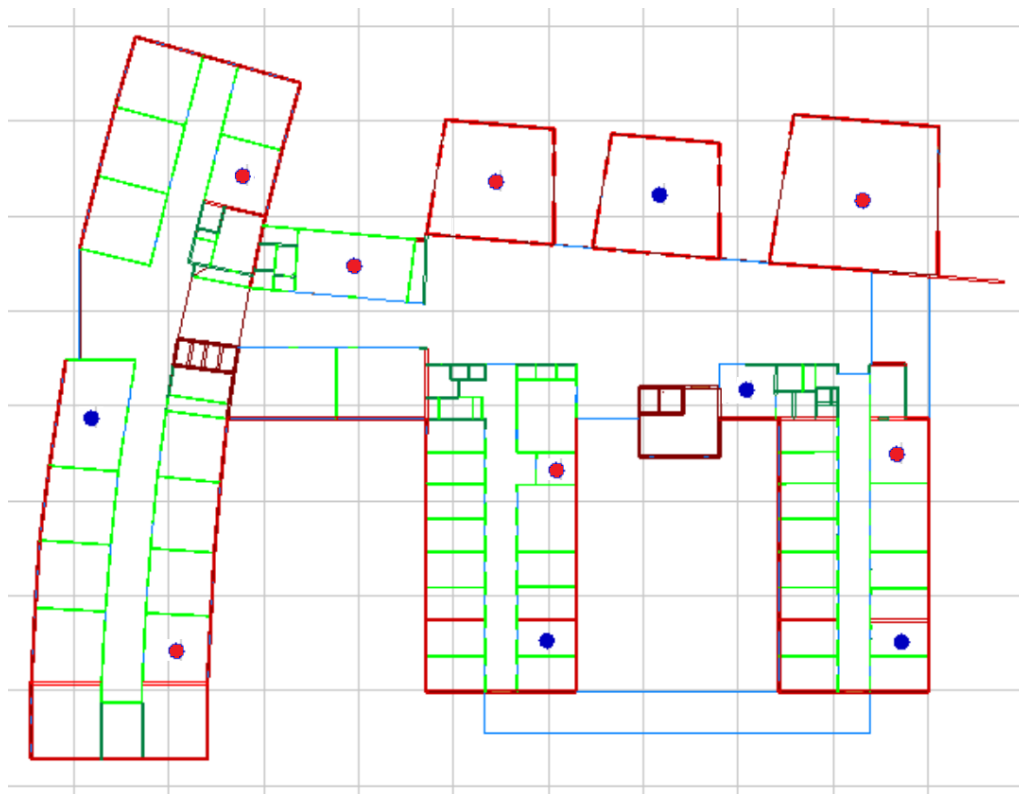
Označení AP	Kanál (2,4 GHz)	Výkon (2,4 GHz) [dBm]	Kanál (5 GHz)	Výkon (5 GHz) [dBm]
LAP1242-FEI-A0117	6	17	48	17
LAP2602-FEI-B0118	1	18	44	18
LAP2602-FEI-A113	6	18	36	18
LAP2602-FEI-A151	1	18	36	18
LAP2602-FEI-A103	11	18	44	18
LAP2602-FEI-B110	6	18	36	18
LAP2602-FEI-B119	6	18	36	18
LAP2602-FEI-B101	11	18	60	18
LAP2602-FEI-B126	1	18	100	23
LAP2602-FEI-A252	1	16	36	18
LAP2602-FEI-A236	11	18	44	18
LAP2602-FEI-A232	6	18	108	23
LAP2602-FEI-A228	11	18	60	18
LAP2602-FEI-A210	11	18	36	18
LAP2602-FEI-A256	1	18	44	18
LAP2602-FEI-A227	1	18	44	18
LAP2602-FEI-A226	6	18	44	18
LAP2602-FEI-B219	1	18	100	23
LAP2602-FEI-B213	6	18	60	18
LAP2602-FEI-B226	11	18	44	18
LAP2602-FEI-B207	1	18	44	18
LAP2602-FEI-A353	6	18	100	23
LAP2602-FEI-A333	1	18	36	18
LAP2602-FEI-A306	6	18	36	18
LAP2602-FEI-B301	1	18	108	23
LAP2602-FEI-B319	11	18	36	18
LAP2602-FEI-B307	11	18	52	18
LAP2602-FEI-B326	6	18	44	18
LAP2602-FEI-A456	6	18	36	18
LAP2602-FEI-A435	11	18	36	18
LAP2602-FEI-A456	11	18	36	18
LAP2602-FEI-A409	11	18	100	23
LAP2602-FEI-A405	1	18	52	18
LAP2602-FEI-A432	6	18	44	18
LAP2602-FEI-A453	11	18	52	18
LAP2602-FEI-B419	1	18	132	23
LAP2602-FEI-B401	6	18	36	18
LAP2602-FEI-B425	11	18	100	23
LAP2602-FEI-B410	1	18	44	18
LAP1242-FEI-A539	6	17	64	17
LAP2602-FEI-A509	6	18	44	18
LAP2602-FEI-A553	1	18	44	18
LAP2602-FEI-A535	1	18	36	18

Příloha D: *Optimalizace počtu vysílacích bodů v budově*

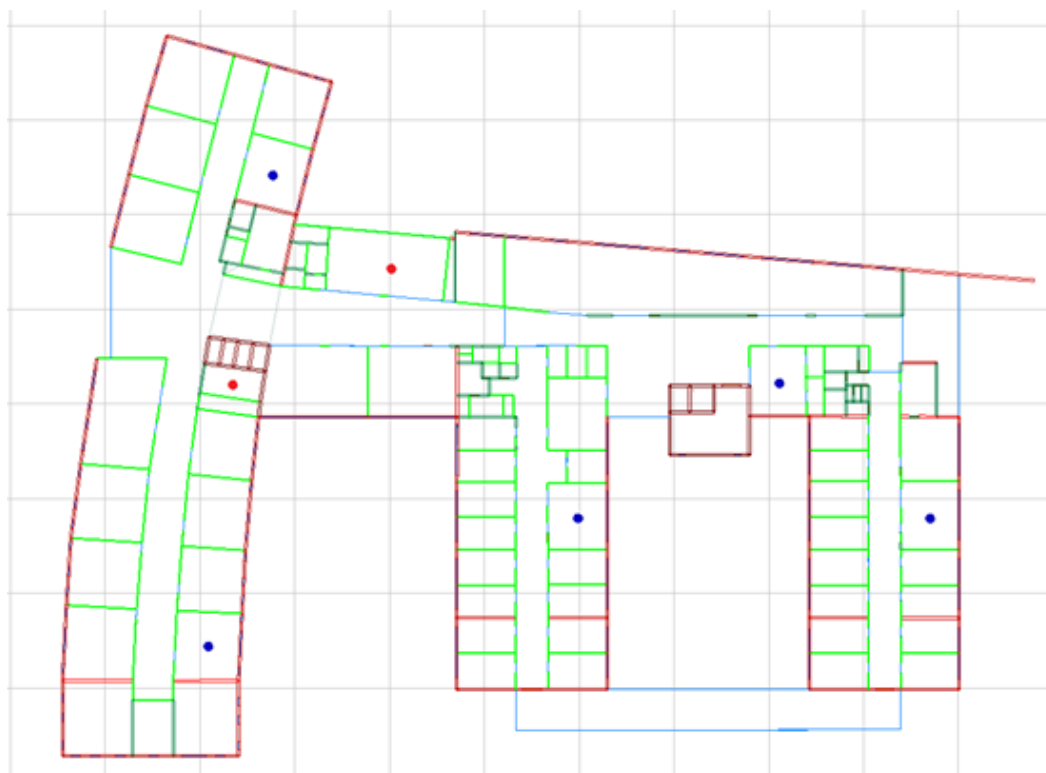
Obrázek D.1: *Optimalizace počtu vysílacích bodů v prvním podlaží*



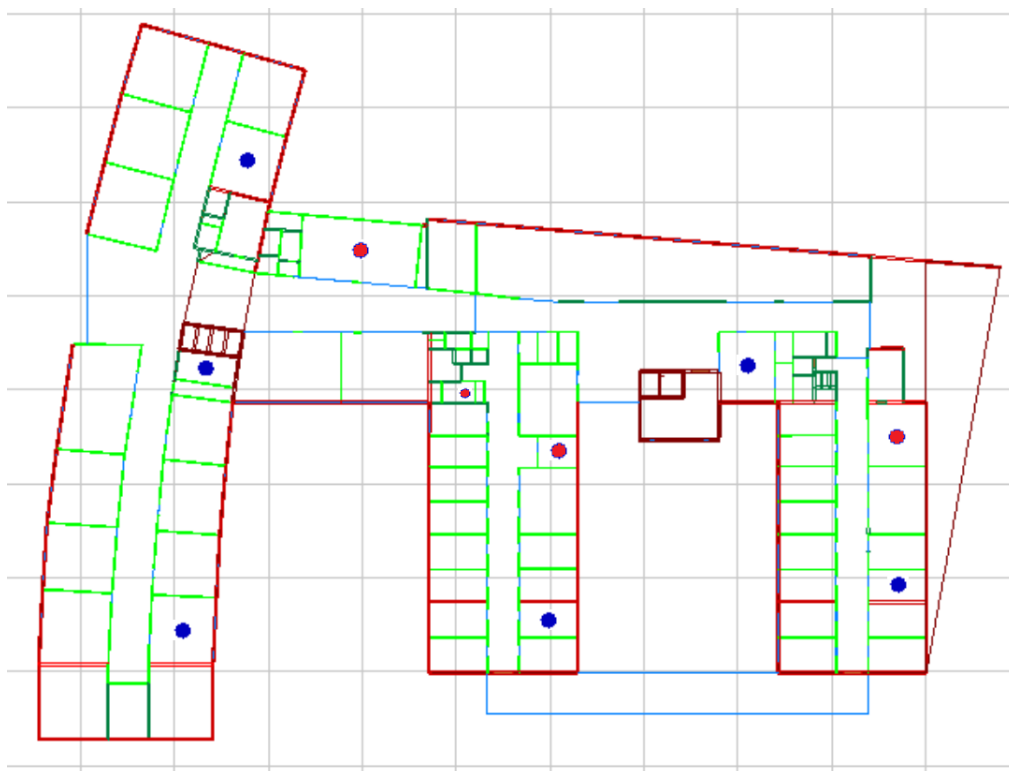
Obrázek D.2: *Optimalizace počtu vysílacích bodů ve druhém podlaží*



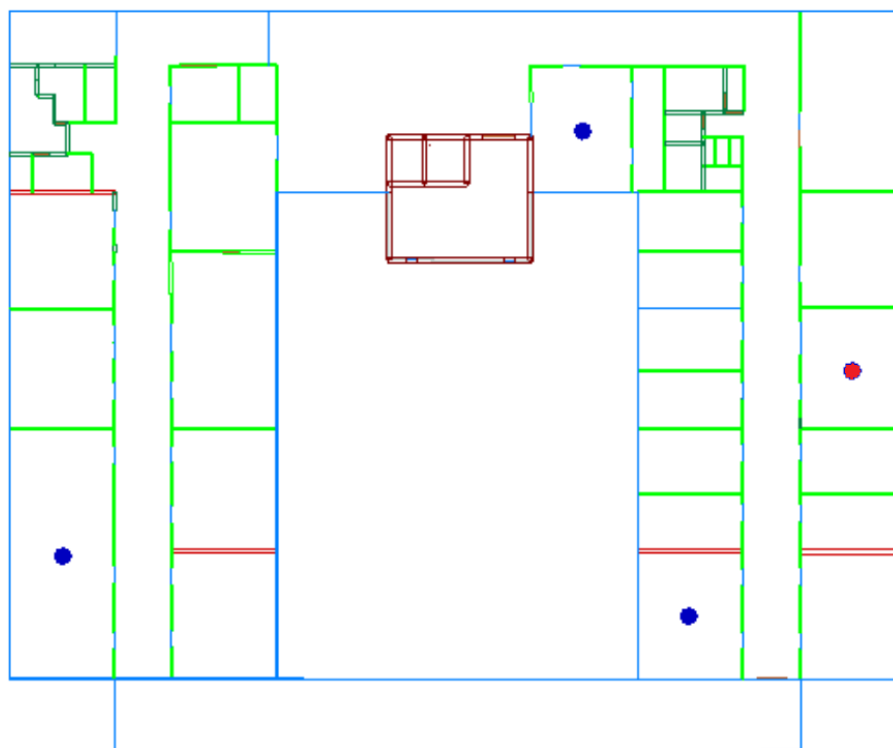
Obrázek D.3: *Optimalizace počtu vysílacích bodů ve třetím podlaží*



Obrázek D.4: *Optimalizace počtu vysílacích bodů ve čtvrtém podlaží*

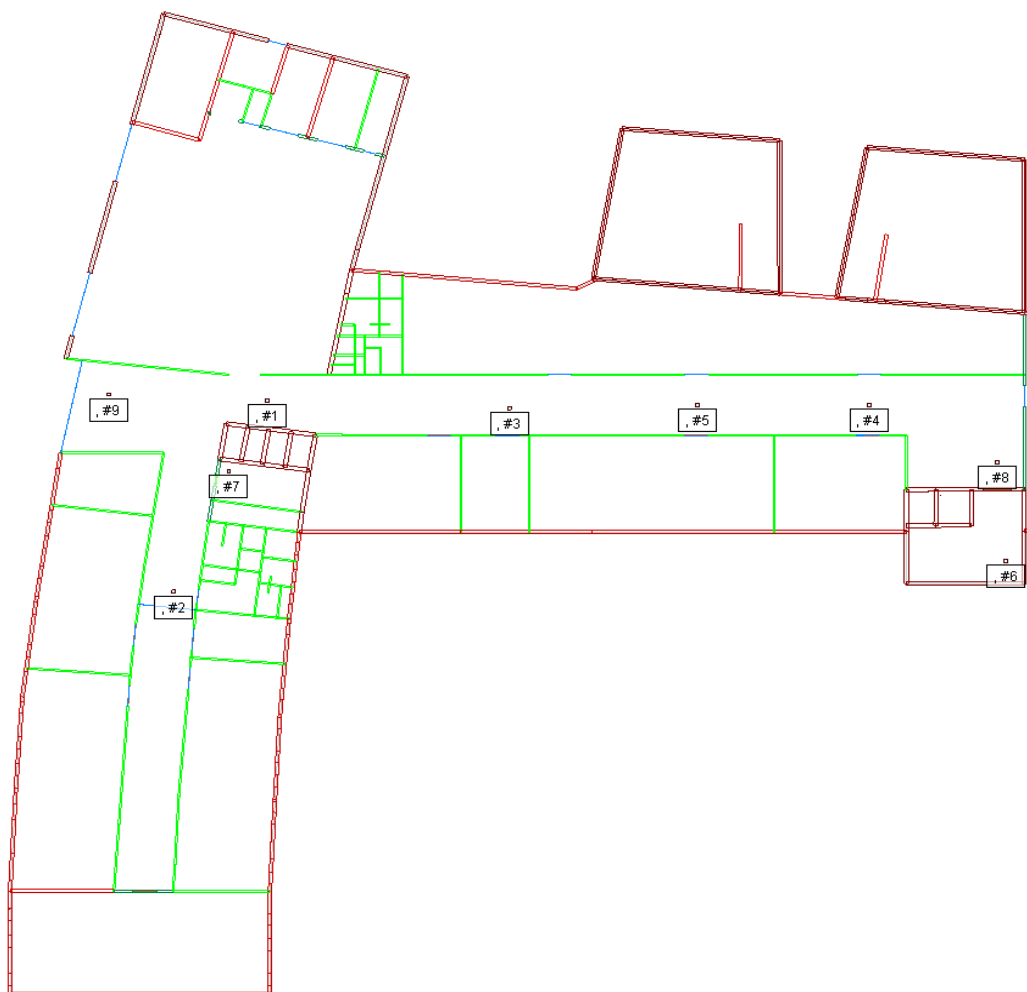


Obrázek D.5: Optimalizace počtu vysílacích bodů v pátém podlaží



Příloha E: Výsledky měření přijímané úrovně signálu

Obrázek E.1: Rozložení měřených bodů v podzemním podlaží



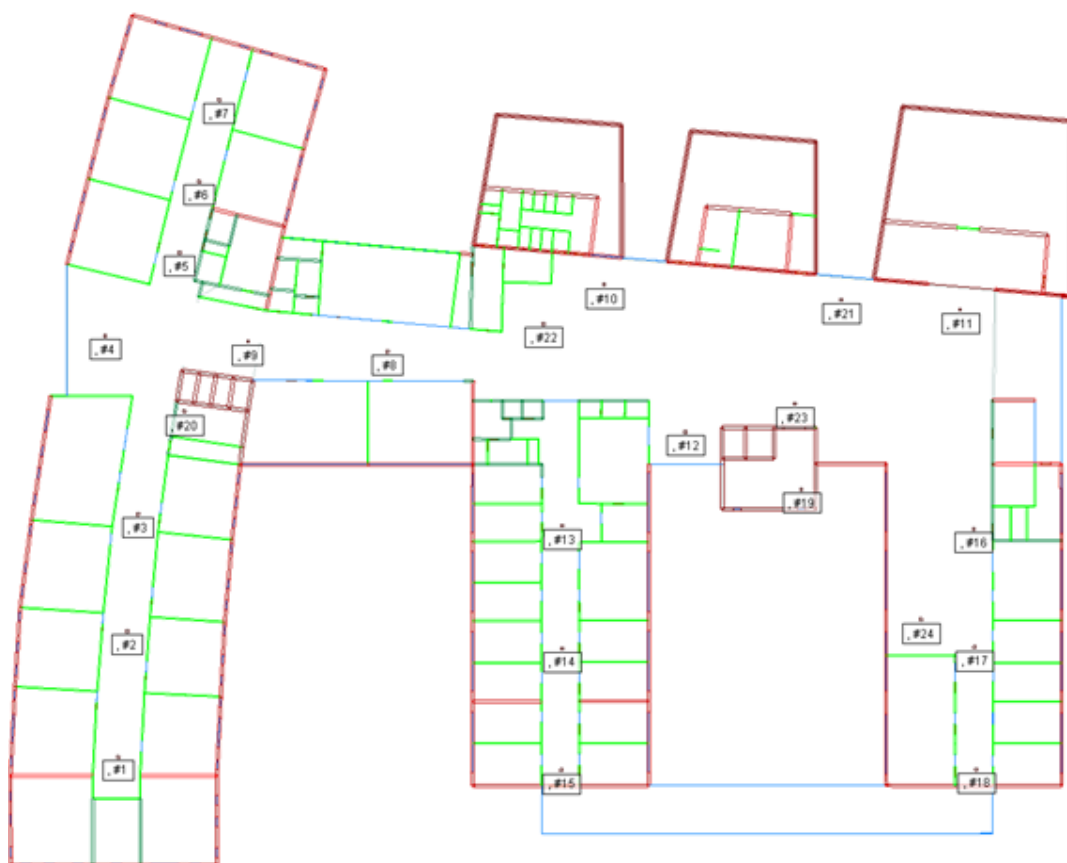
Tabulka E.1.1: Měření přijímané úrovně signálu v podzemním podlaží v odpoledních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite	iPhone 5	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320	Odchylka [dB]
1	-40	-44	4	-44	4	-51	11	-52	12
2	-42	-46	4	-48	6	-45	3	-52	10
3	-43	-50	7	-57	14	-54	11	-51	8
4	-51	-54	3	-58	7	-56	5	-60	9
5	-42	-49	7	-51	9	-50	8	-52	10
6	-55	-59	4	-64	9	-62	7	-61	6
7	-43	-49	6	-52	9	-51	8	-53	10
8	-52	-61	9	-62	10	-58	6	-59	7
9	-40	-47	7	-49	9	-51	11	-50	10
Průměr	-45	-51	6	-54	9	-53	8	-54	9

Tabulka E.1.2: Měření přijímané úrovně signálu v podzemním podlaží ve večerních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite	iPhone 5	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320	Odchylka [dB]
1	-40	-51	11	-53	13	-45	5	-51	11
2	-42	-42	0	-54	12	-54	12	-53	11
3	-43	-50	7	-53	10	-52	9	-48	5
4	-51	-63	12	-55	4	-57	6	-55	4
5	-42	-49	7	-42	0	-45	3	-46	4
6	-55	-57	2	-60	5	-61	6	-63	8
7	-43	-52	9	-52	9	-52	9	-52	9
8	-52	-61	9	-54	2	-57	5	-52	0
9	-40	-51	11	-41	1	-52	12	-53	13
Průměr	-45	-53	8	-52	6	-53	7	-53	7

Obrázek E.2: Rozložení měřených bodů v prvním podlaží



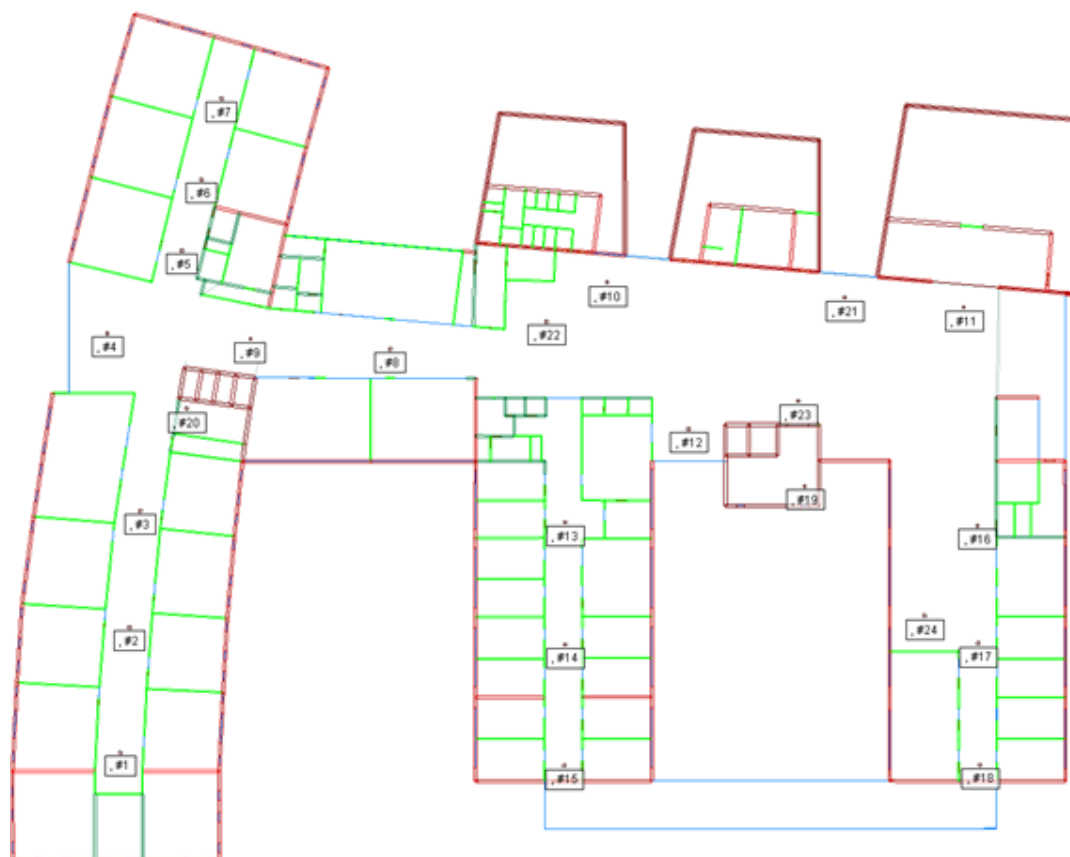
Tabulka E.2.1: Měření přijímané úrovně signálu v prvním podlaží v odpoledních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite [dBm]	iPhone 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1 [dBm]	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320 [dBm]	Odchylka [dB]
1	-38	-46	8	-48	10	-49	11	-52	14
2	-40	-52	12	-54	14	-50	10	-51	11
3	-37	-53	16	-45	8	-49	12	-50	13
4	-38	-48	10	-47	9	-50	12	-44	6
5	-41	-55	14	-48	7	-46	5	-51	10
6	-37	-52	15	-46	9	-45	8	-50	13
7	-42	-44	2	-43	1	-45	3	-56	14
8	-37	-58	21	-51	14	-58	21	-46	9
9	-45	-51	6	-52	7	-52	7	-51	6
10	-39	-44	5	-50	11	-53	14	-52	13
11	-42	-49	7	-52	10	-48	6	-53	11
12	-42	-46	4	-54	12	-51	9	-51	9
13	-36	-45	9	-49	13	-47	11	-46	10
14	-36	-45	9	-53	17	-48	12	-47	11
15	-37	-44	7	-45	8	-47	10	-49	12
16	-38	-46	8	-54	16	-48	10	-47	9
17	-37	-45	8	-48	11	-43	6	-48	11
18	-38	-48	10	-46	8	-44	6	-49	11
19	-47	-55	8	-57	10	-58	11	-57	10
20	-37	-47	10	-52	15	-47	10	-50	13
21	-42	-50	8	-53	11	-47	5	-56	14
22	-40	-51	11	-48	8	-52	12	-46	6
23	-51	-51	10	-52	11	-56	15	-57	16
24	-43	-50	7	-52	9	-53	10	-54	11
Průměr	-40	-49	9	-50	10	-49	10	-51	11

Tabulka E.2.2: Měření přijímané úrovně signálu v prvním podlaží ve večerních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite [dBm]	iPhone 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1 [dBm]	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320 [dBm]	Odchylka [dB]
1	-38	-44	6	-51	13	-42	4	-51	13
2	-40	-50	10	-53	13	-50	10	-55	15
3	-37	-45	8	-50	13	-40	3	-53	16
4	-38	-46	8	-51	13	-52	14	-56	18
5	-41	-53	12	-47	6	-55	14	-53	12
6	-37	-49	12	-48	11	-49	12	-50	13
7	-42	-51	9	-55	13	-56	14	-49	7
8	-37	-52	15	-51	14	-52	15	-43	6
9	-45	-56	11	-59	14	-55	10	-58	13
10	-39	-48	9	-49	10	-50	11	-49	10
11	-42	-49	7	-52	10	-51	9	-60	18
12	-42	-60	18	-48	6	-55	13	-42	0
13	-36	-51	15	-40	4	-45	9	-51	15
14	-36	-48	12	-48	12	-50	14	-48	12
15	-37	-51	14	-49	12	-41	4	-52	15
16	-38	-48	10	-49	11	-42	4	-49	11
17	-37	-50	13	-51	14	-47	10	-47	10
18	-38	-51	13	-41	3	-48	10	-50	12
19	-47	-52	5	-53	6	-54	7	-51	4
20	-37	-50	13	-49	12	-49	12	-52	15
21	-42	-55	13	-55	13	-42	0	-59	17
22	-40	-47	7	-55	15	-49	9	-49	9
23	-51	-48	7	-54	13	-52	11	-51	10
24	-43	-52	9	-51	8	-56	13	-49	6
Průměr	-40	-50	11	-50	11	-49	10	-51	12

Obrázek E.3: Rozložení měřených bodů ve druhém podlaží



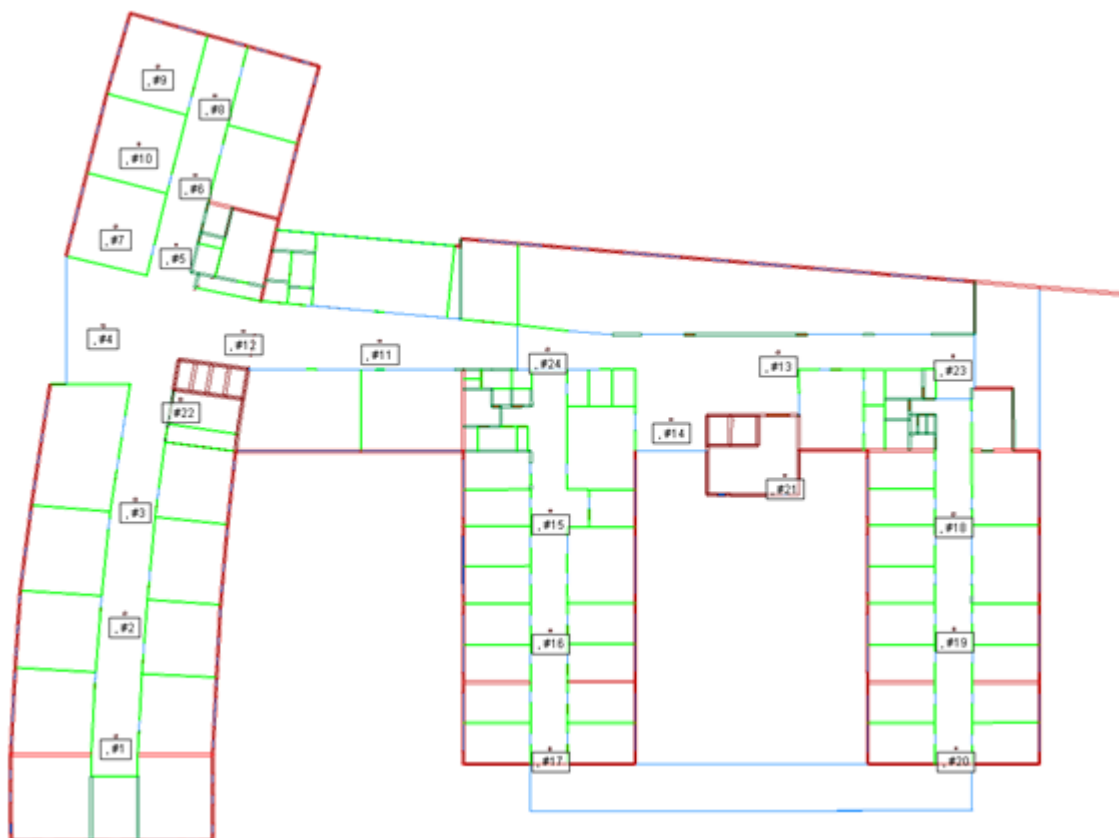
Tabulka E.3.1: Měření přijímané úrovně signálu ve druhém podlaží v odpoledních hodinách

Měřený bod	Wireless Insite [dBm]	iPhone 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1 [dBm]	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320 [dBm]	Odchylka [dB]
1	-39	-48	9	-51	12	-50	11	-53	14
2	-38	-46	8	-49	11	-48	10	-52	14
3	-37	-50	13	-55	18	-51	14	-54	17
4	-37	-56	19	-54	17	-52	15	-59	22
5	-33	-55	22	-41	8	-50	17	-56	23
6	-33	-56	23	-57	24	-46	13	-47	14
7	-38	-50	12	-54	16	-52	14	-45	7
8	-37	-45	8	-55	18	-47	10	-50	13
9	-35	-46	11	-58	23	-55	20	-46	11
10	-39	-53	14	-50	11	-51	12	-54	15
11	-36	-45	9	-47	11	-47	11	-59	23
12	-38	-55	17	-56	18	-53	15	-50	12
13	-37	-46	9	-49	12	-48	11	-51	14
14	-38	-57	19	-54	16	-58	20	-54	16
15	-42	-52	10	-54	12	-54	12	-57	15
16	-38	-58	20	-44	6	-50	12	-60	22
17	-36	-51	15	-57	21	-58	22	-42	6
18	-35	-48	13	-47	12	-56	21	-50	15
19	-43	-51	8	-56	13	-52	9	-50	7
20	-42	-52	10	-51	9	-59	17	-56	14
21	-35	-56	21	-56	21	-42	7	-49	14
22	-36	-57	21	-53	17	-49	13	-45	9
23	-38	-49	11	-58	20	-52	14	-48	10
24	-38	-51	13	-52	14	-48	10	-48	10
25	-37	-47	10	-53	16	-53	16	-54	17
26	-38	-52	14	-46	8	-44	6	-52	14
27	-36	-43	7	-44	8	-46	10	-55	19
28	-37	-50	13	-59	22	-59	22	-44	7
29	-38	-50	12	-51	13	-54	16	-52	14
30	-43	-53	10	-56	13	-51	8	-52	9
31	-35	-52	17	-56	21	-53	18	-43	8
32	-37	-52	15	-55	18	-53	16	-54	17
Průměr	-38	-51	14	-52	15	-51	14	-51	14

Tabulka E.3.2: Měření přijímané úrovně signálu ve druhém podlaží ve večerních hodinách

Měřený bod	Wireless Insite [dBm]	iPhone 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1 [dBm]	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320 [dBm]	Odchylka [dB]
1	-39	-48	9	-45	6	-50	11	-52	13
2	-38	-48	10	-56	18	-51	13	-48	10
3	-37	-45	8	-48	11	-51	14	-53	16
4	-37	-49	12	-49	12	-43	6	-41	4
5	-33	-41	8	-58	25	-51	18	-47	14
6	-33	-45	12	-48	15	-52	19	-44	11
7	-38	-47	9	-43	5	-58	20	-41	3
8	-37	-47	10	-40	3	-50	13	-50	13
9	-35	-52	17	-52	17	-60	25	-43	8
10	-39	-43	4	-51	12	-53	14	-46	7
11	-36	-54	18	-43	7	-42	6	-56	20
12	-38	-55	17	-55	17	-42	4	-47	9
13	-37	-47	10	-55	18	-41	4	-55	18
14	-38	-47	9	-57	19	-48	10	-52	14
15	-42	-47	5	-45	3	-46	4	-60	18
16	-38	-55	17	-56	18	-55	17	-41	3
17	-36	-55	19	-45	9	-44	8	-47	11
18	-35	-54	19	-47	12	-53	18	-55	20
19	-43	-54	11	-60	17	-47	4	-49	6
20	-42	-45	3	-45	3	-52	10	-53	11
21	-35	-45	10	-54	19	-48	13	-43	8
22	-36	-52	16	-41	5	-51	15	-40	4
23	-38	-52	14	-46	8	-48	10	-57	19
24	-38	-46	8	-43	5	-56	18	-47	9
25	-37	-44	7	-42	5	-58	21	-57	20
26	-38	-56	18	-50	12	-58	20	-42	4
27	-36	-46	10	-54	18	-46	10	-40	4
28	-37	-56	19	-47	10	-48	11	-56	19
29	-38	-57	19	-48	10	-54	16	-56	18
30	-43	-44	1	-56	13	-56	13	-46	3
31	-35	-48	13	-53	18	-52	17	-49	14
32	-37	-47	10	-52	15	-44	7	-40	3
Průměr	-38	-49	12	-50	12	-50	13	-49	11

Obrázek E.4: Rozložení měřených bodů ve třetím podlaží



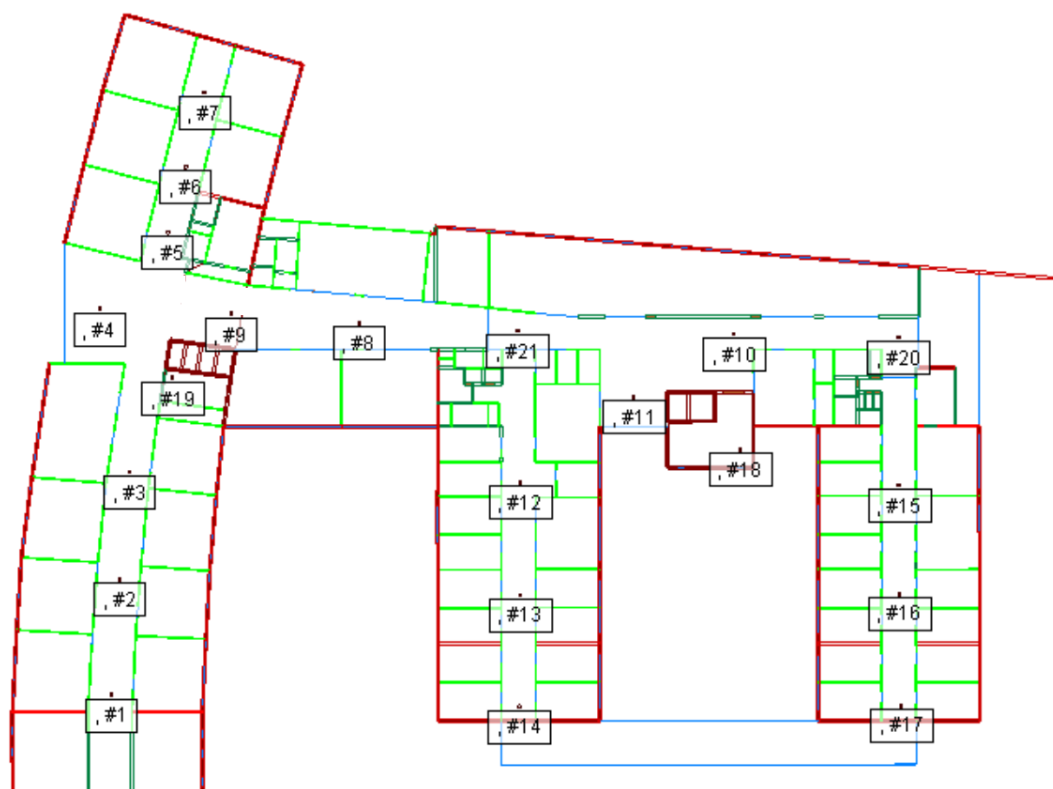
Tabulka E.4.1: Měření přijímané úrovně signálu ve třetím podlaží v odpoledních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite [dBm]	iPhone 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1 [dBm]	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320 [dBm]	Odchylka [dB]
1	-30	-43	13	-46	16	-46	16	-49	19
2	-36	-48	12	-49	13	-52	16	-54	18
3	-37	-46	9	-50	13	-46	9	-49	12
4	-35	-45	10	-48	13	-47	12	-51	16
5	-33	-49	16	-50	17	-44	11	-44	11
6	-33	-44	11	-48	15	-45	12	-46	13
7	-34	-47	14	-49	15	-49	15	-51	17
8	-38	-46	8	-47	9	-47	9	-47	9
9	-40	-55	15	-53	13	-59	19	-57	17
10	-41	-50	9	-52	11	-53	12	-51	10
11	-42	-47	5	-51	9	-54	12	-49	7
12	-43	-51	8	-55	12	-48	5	-52	9
13	-42	-51	9	-55	13	-58	16	-59	17
14	-44	-54	10	-56	12	-56	12	-54	10
15	-35	-46	11	-48	13	-51	16	-45	10
16	-37	-49	12	-47	10	-49	12	-51	14
17	-38	-44	6	-48	10	-50	12	-50	12
18	-33	-47	14	-47	14	-48	15	-52	19
19	-35	-50	15	-47	12	-51	16	-49	14
20	-34	-46	12	-47	13	-52	18	-48	14
21	-34	-45	11	-47	13	-50	16	-48	14
22	-36	-44	8	-47	11	-50	14	-48	12
23	-43	-52	9	-51	8	-55	12	-54	11
24	-42	-53	11	-57	15	-54	12	-58	16
Průměr	-37	-48	11	-50	13	-51	14	-51	13

Tabulka E.4.2: Měření přijímané úrovně signálu ve třetím podlaží ve večerních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite [dBm]	iPhone 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1 [dBm]	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5 [dBm]	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320 [dBm]	Odchylka [dB]
1	-30	-43	13	-47	17	-42	12	-45	15
2	-36	-53	17	-43	7	-42	6	-50	14
3	-37	-43	6	-50	13	-48	11	-47	10
4	-35	-41	6	-45	10	-51	16	-48	13
5	-33	-52	19	-45	12	-43	10	-49	16
6	-33	-42	9	-51	18	-51	18	-53	20
7	-34	-41	7	-46	12	-53	19	-46	12
8	-38	-47	9	-47	9	-53	15	-40	2
9	-40	-52	12	-50	10	-50	10	-52	12
10	-41	-52	11	-42	1	-57	16	-55	14
11	-42	-53	11	-50	8	-60	18	-49	7
12	-43	-52	9	-46	3	-48	5	-46	3
13	-42	-54	12	-43	1	-50	8	-60	18
14	-44	-53	9	-60	16	-44	0	-59	15
15	-35	-49	14	-50	15	-49	14	-56	21
16	-37	-49	12	-45	8	-43	6	-42	5
17	-38	-54	16	-54	16	-46	8	-40	2
18	-33	-49	16	-43	10	-45	12	-51	18
19	-35	-54	19	-48	13	-54	19	-48	13
20	-34	-49	15	-43	9	-48	14	-43	9
21	-34	-51	17	-52	18	-49	15	-48	14
22	-36	-51	15	-42	6	-50	14	-46	10
23	-43	-60	17	-50	7	-53	10	-54	11
24	-42	-50	8	-59	17	-50	8	-48	6
Průměr	-37	-50	13	-48	11	-49	12	-49	12

Obrázek E.5: Rozložení měřených bodů ve čtvrtém podlaží



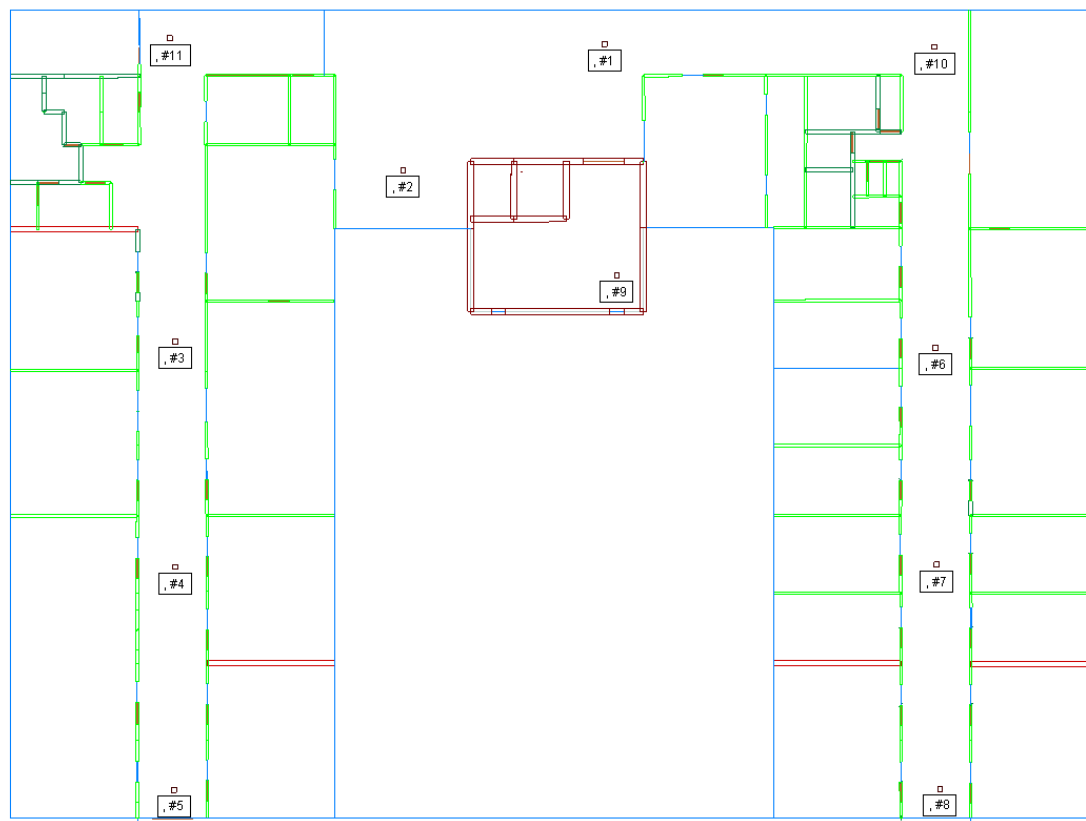
Tabulka E.5.1: Měření přijímané úrovně signálu ve čtvrtém podlaží v odpoledních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite	iPhone 5	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320	Odchylka [dB]
1	-32	-45	13	-53	21	-48	16	-48	16
2	-35	-46	11	-47	12	-52	17	-52	17
3	-38	-45	7	-46	8	-46	8	-47	9
4	-35	-51	16	-48	13	-52	17	-54	19
5	-34	-52	18	-53	19	-54	20	-48	14
6	-33	-46	13	-50	17	-51	18	-47	14
7	-36	-45	9	-45	9	-47	11	-46	10
8	-43	-51	8	-46	3	-47	4	-45	2
9	-41	-52	11	-46	5	-53	12	-50	9
10	-42	-47	5	-50	8	-51	9	-49	7
11	-40	-52	12	-50	10	-52	12	-56	16
12	-34	-48	14	-47	13	-51	17	-50	16
13	-36	-44	8	-46	10	-52	16	-50	14
14	-36	-47	11	-52	16	-53	17	-51	15
15	-34	-46	12	-52	18	-53	19	-46	12
16	-35	-44	9	-52	17	-45	10	-49	14
17	-33	-50	17	-48	15	-48	15	-52	19
18	-35	-42	7	-50	15	-45	10	-51	16
19	-34	-44	10	-45	11	-49	15	-48	14
20	-41	-48	7	-51	10	-53	12	-52	11
21	-37	-49	12	-51	14	-49	12	-50	13
Průměr	-32	-43	11	-44	12	-45	13	-44	12

Tabulka E.5.2: Měření přijímané úrovně signálu ve čtvrtém podlaží ve večerních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite	iPhone 5	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320	Odchylka [dB]
1	-32	-46	14	-46	14	-48	16	-46	14
2	-35	-46	11	-54	19	-49	14	-50	15
3	-38	-51	13	-57	19	-52	14	-47	9
4	-35	-49	14	-52	17	-50	15	-45	10
5	-34	-45	11	-50	16	-48	14	-52	18
6	-33	-47	14	-51	18	-49	16	-51	18
7	-36	-50	14	-52	16	-54	18	-50	14
8	-43	-55	12	-60	17	-59	16	-53	10
9	-41	-58	17	-48	7	-48	7	-45	4
10	-42	-50	8	-47	5	-54	12	-46	4
11	-40	-52	12	-48	8	-52	12	-54	14
12	-34	-48	14	-48	14	-52	18	-52	18
13	-36	-46	10	-49	13	-52	16	-48	12
14	-36	-50	14	-55	19	-54	18	-52	16
15	-34	-49	15	-47	13	-50	16	-52	18
16	-35	-49	14	-49	14	-51	16	-46	11
17	-33	-49	16	-48	15	-49	16	-49	16
18	-35	-45	10	-49	14	-52	17	-51	16
19	-34	-45	11	-52	18	-52	18	-50	16
20	-41	-53	12	-46	5	-53	12	-55	14
21	-37	-46	9	-53	16	-50	13	-49	12
Průměr	-32	-43	11	-44	12	-45	13	-44	12

Obrázek E.6: Rozložení měřených bodů v pátém podlaží



Tabulka E.6.1: Měření přijímané úrovně signálu v pátém podlaží v odpoledních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite	iPhone 5	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320	Odchylka [dB]
1	-43	-56	13	-52	9	-59	16	-52	9
2	-42	-57	15	-56	14	-50	8	-51	9
3	-36	-53	17	-48	12	-49	13	-50	14
4	-35	-48	13	-45	10	-50	15	-44	9
5	-37	-55	18	-48	11	-47	10	-51	14
6	-37	-52	15	-49	12	-55	18	-50	13
7	-36	-44	8	-49	13	-45	9	-52	16
8	-35	-48	13	-51	16	-58	23	-46	11
9	-41	-51	10	-52	11	-59	18	-51	10
10	-42	-48	6	-50	8	-56	14	-52	10
11	-37	-51	14	-54	17	-48	11	-47	10
Průměr	-38	-51	13	-50	12	-52	14	-50	11

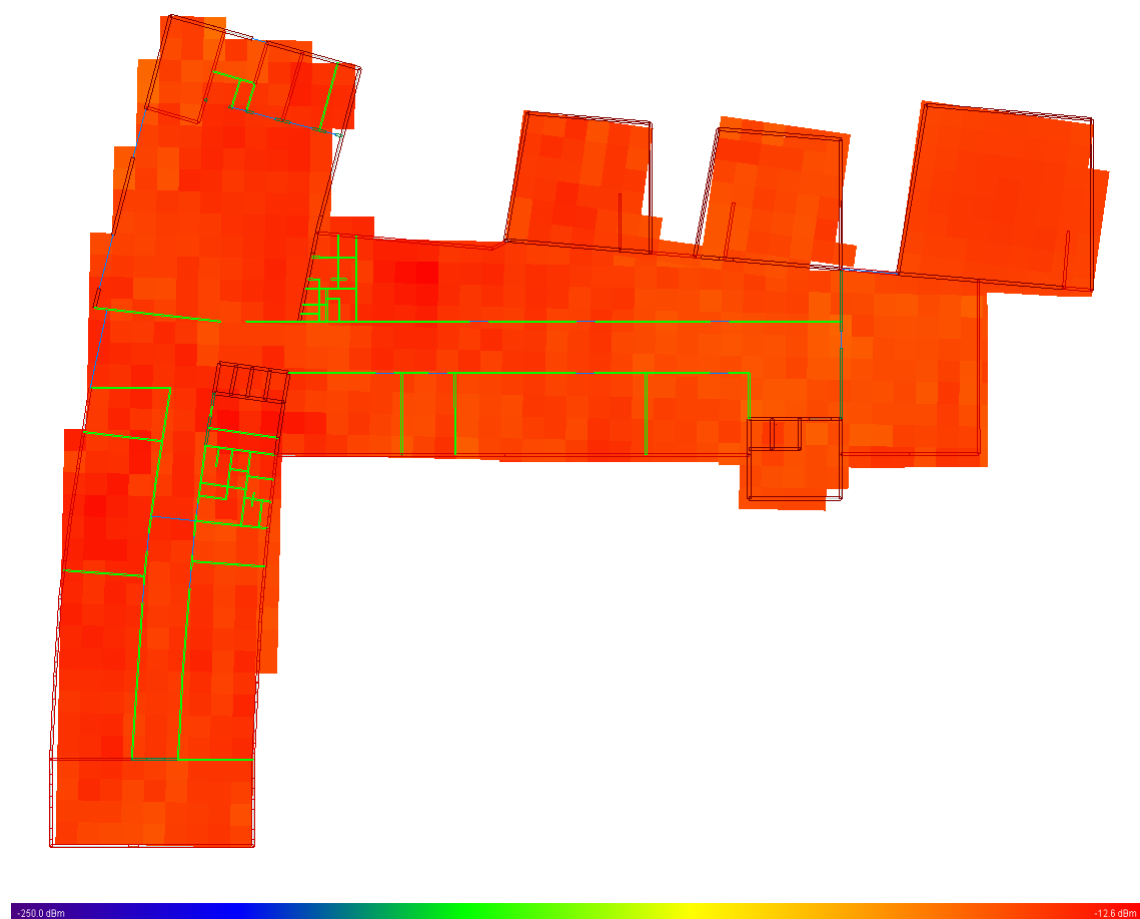
Tabulka E.6.2: Měření přijímané úrovně signálu v pátém podlaží v odpoledních hodinách

Číslo měřeného bodu	Wireless Insite	iPhone 5	Odchylka [dB]	Sony Xperia Z1	Odchylka [dB]	Xiaomi Mi 5	Odchylka [dB]	Lenovo Miix 320	Odchylka [dB]
1	-43	-55	12	-48	5	-59	16	-52	9
2	-42	-54	12	-50	8	-46	4	-58	16
3	-36	-49	13	-52	16	-45	9	-45	9
4	-35	-52	17	-53	18	-48	13	-49	14
5	-37	-47	10	-45	8	-48	11	-55	18
6	-37	-49	12	-50	13	-51	14	-55	18
7	-36	-51	15	-55	19	-52	16	-54	18
8	-35	-53	18	-52	17	-47	12	-53	18
9	-41	-57	16	-49	8	-46	5	-54	13
10	-42	-53	11	-59	17	-51	9	-47	5
11	-37	-53	16	-55	18	-52	15	-52	15
Průměr	-38	-52	14	-52	13	-50	11	-52	14

Příloha F: *Výsledky měření přijímané úrovně signálu na stejném místě v čase*

Čas měření [s]	Úroveň [dBm]	Úroveň [dBm]	Úroveň [dBm]
1	-56	-43	-46
2	-50	-49	-43
3	-55	-48	-58
4	-48	-53	-49
5	-49	-60	-49
6	-43	-57	-50
7	-49	-52	-46
8	-54	-52	-58
9	-44	-46	-60
10	-48	-50	-58
11	-56	-55	-57
12	-59	-54	-59
13	-41	-59	-49
14	-50	-53	-48
15	-42	-54	-51
16	-53	-52	-43
17	-42	-50	-57
18	-41	-58	-58
19	-43	-50	-42
20	-56	-45	-44
21	-43	-54	-54
22	-58	-45	-57
23	-43	-55	-49
24	-41	-58	-44
25	-60	-61	-54
26	-46	-52	-50
27	-49	-44	-59
28	-44	-44	-45
29	-57	-60	-46
30	-46	-42	-51
Minimum	-41	-42	-42
Průměr	-49	-52	-51
Maximum	-60	-61	-60

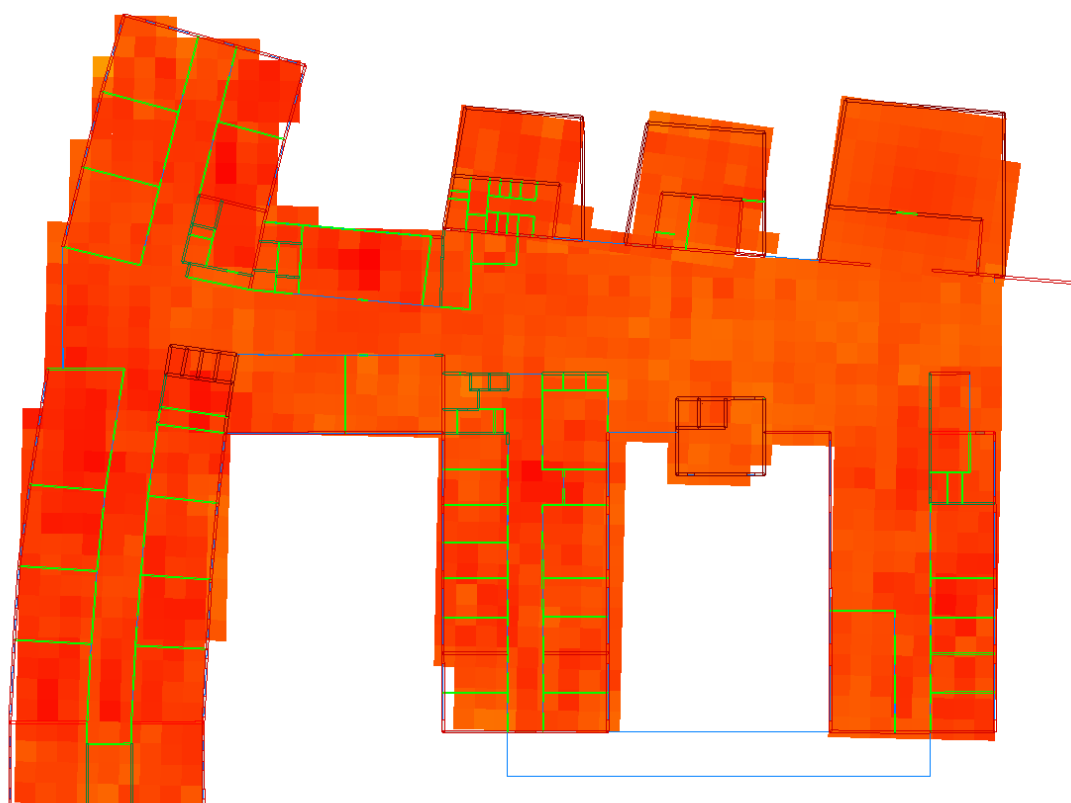
Příloha G: *Výsledky simulací pokrytí signálem v podlažích*



Obrázek G.1: *Simulace pokrytí v podzemním podlaží v pásmu 2,4 GHz*

Tabulka G.1: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.1*

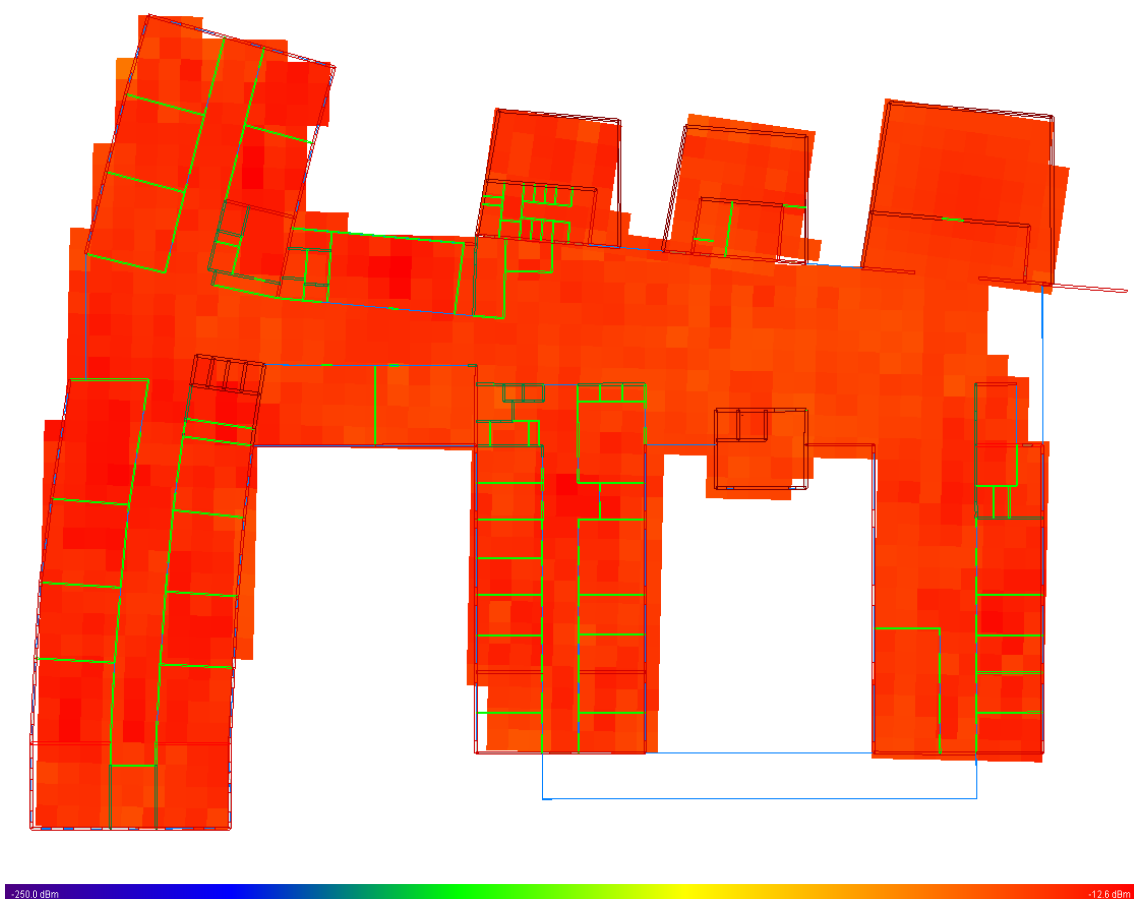
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-60	-41	-21	6



Obrázek G.2: Simulace pokrytí v prvním podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka G.2: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.2

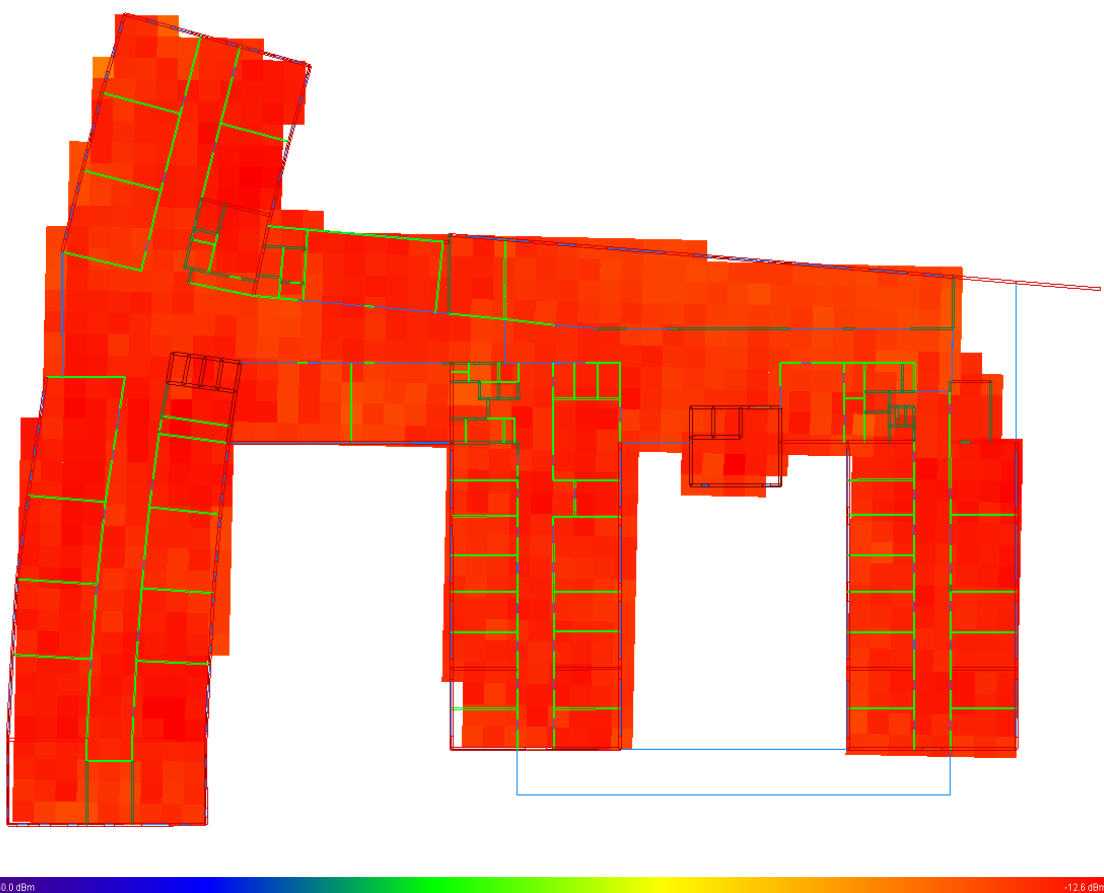
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-62	-37	-19	6



Obrázek G.3: Simulace pokrytí ve druhém podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka G.3: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.3

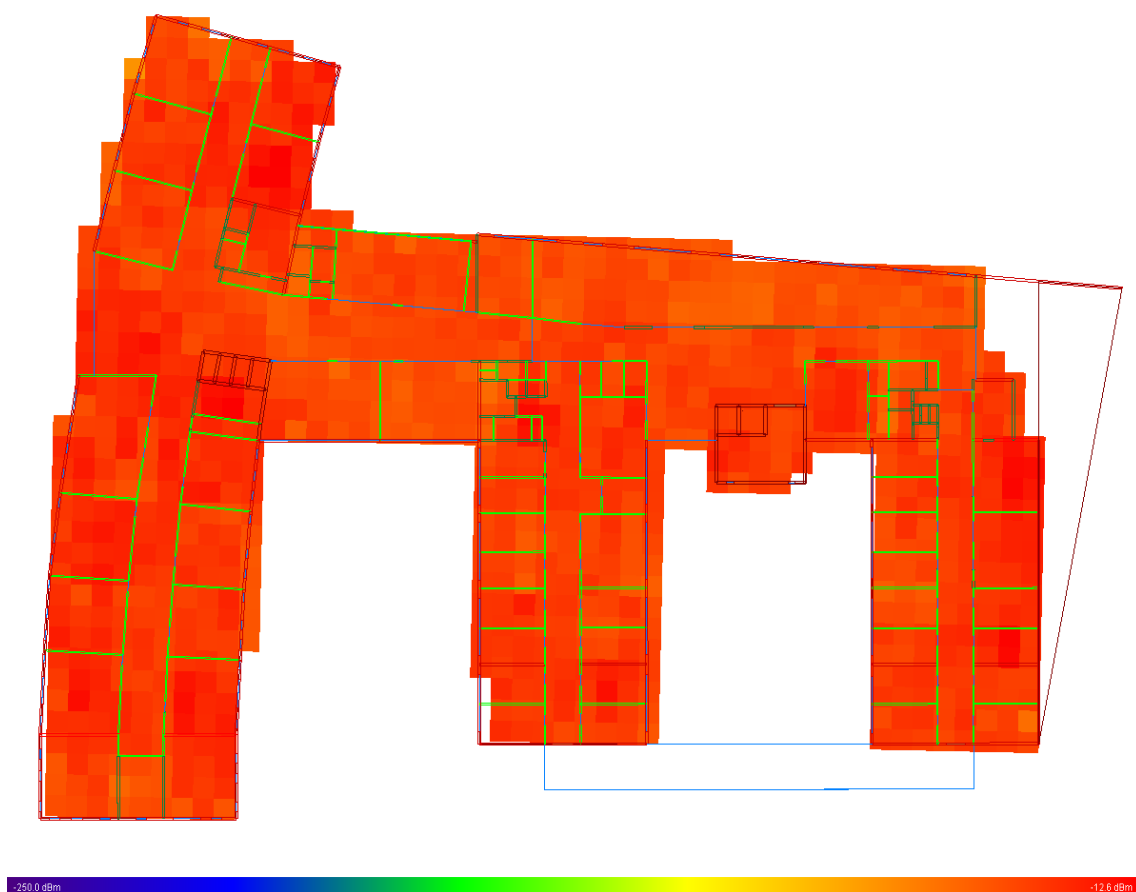
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-60	-41	-21	6



Obrázek G.4: Simulace pokrytí ve třetím podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka G.4: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.4

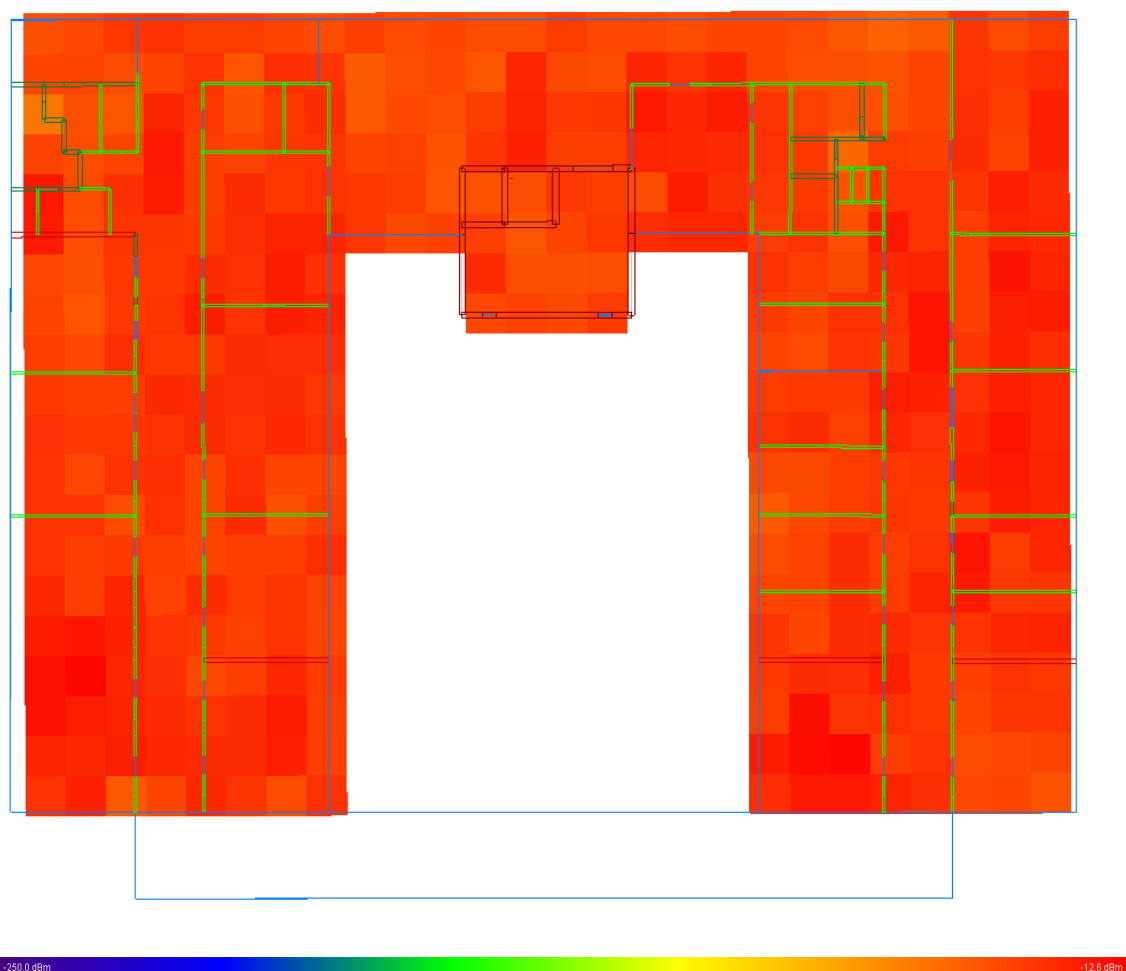
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-65	-33	-18	6



Obrázek G.5: Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka G.5: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.5

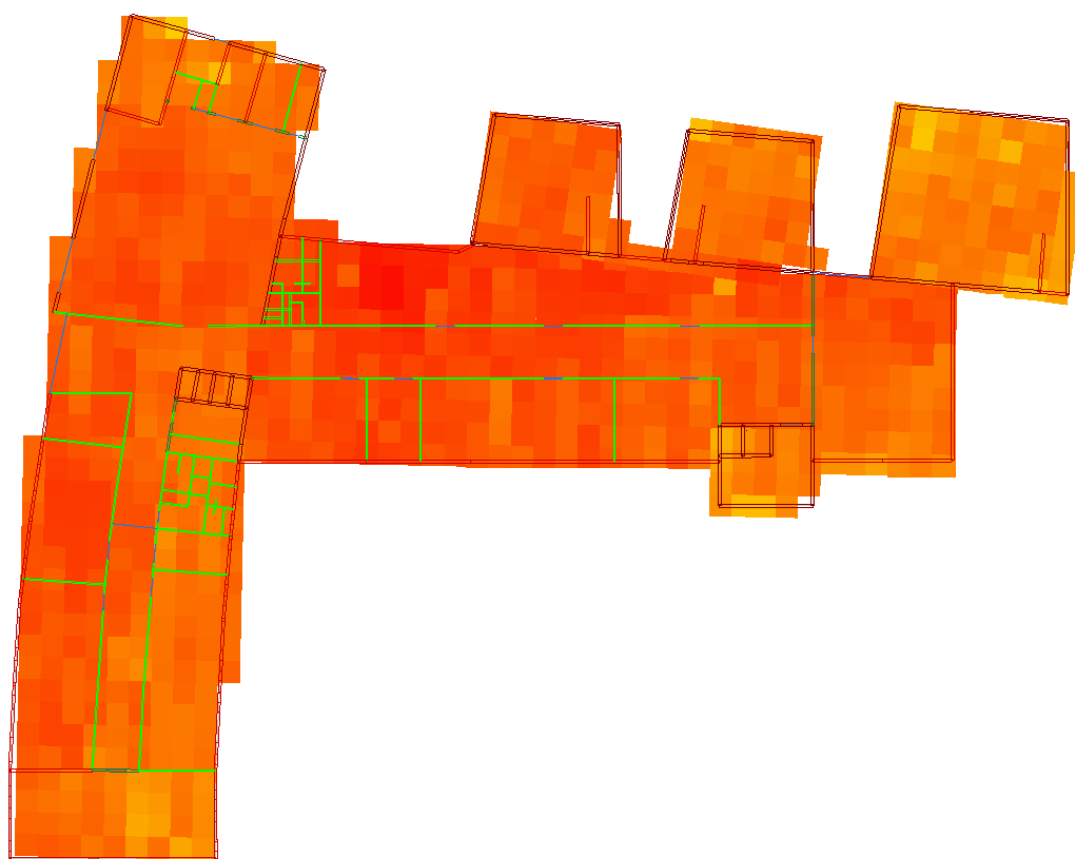
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-60	-35	-17	5



Obrázek G.6: Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka G.6: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.6

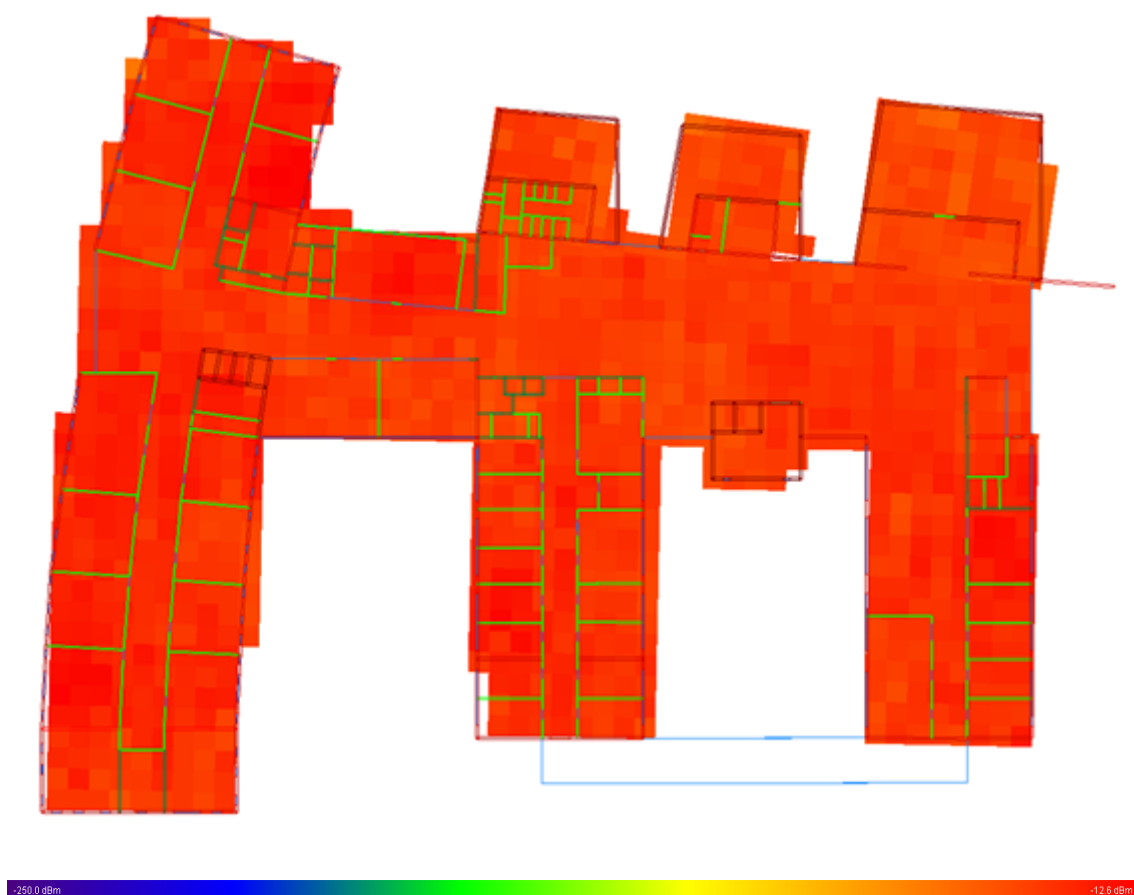
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-51	-33	-20	5



Obrázek G.7: Simulace pokrytí v podzemním podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka G.7: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.7

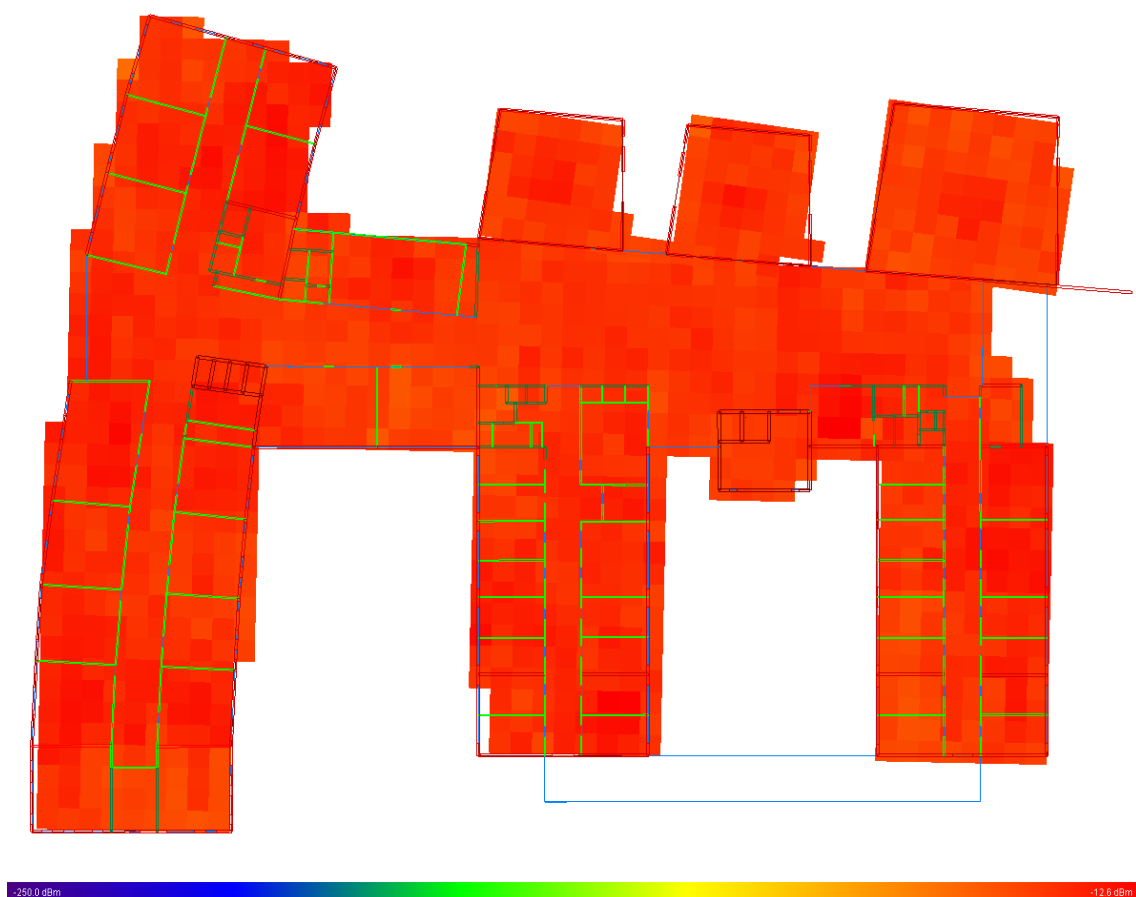
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-66	-43	-22	6



Obrázek G.8: Simulace pokrytí v prvním podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka G.8: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.8

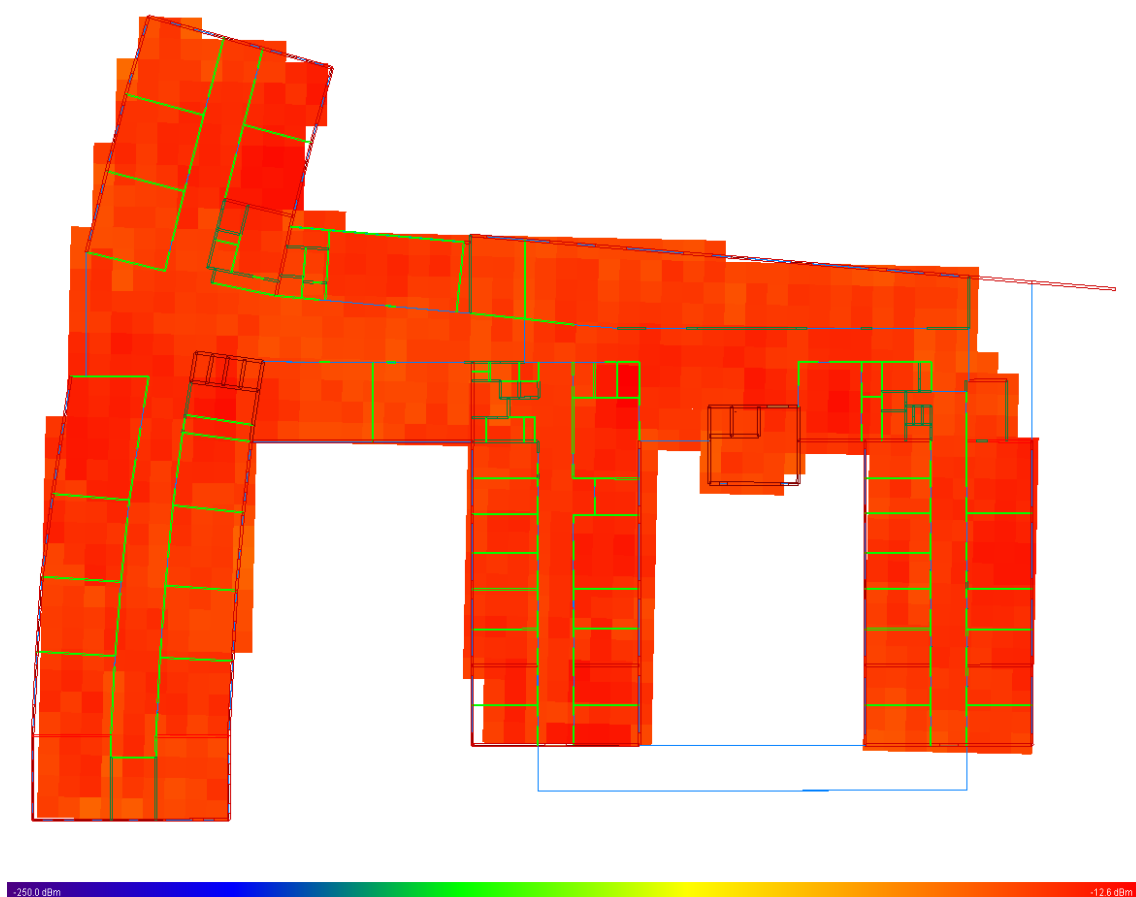
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-64	-39	-22	6



Obrázek G.9: Simulace pokrytí ve druhém podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka G.9: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.9

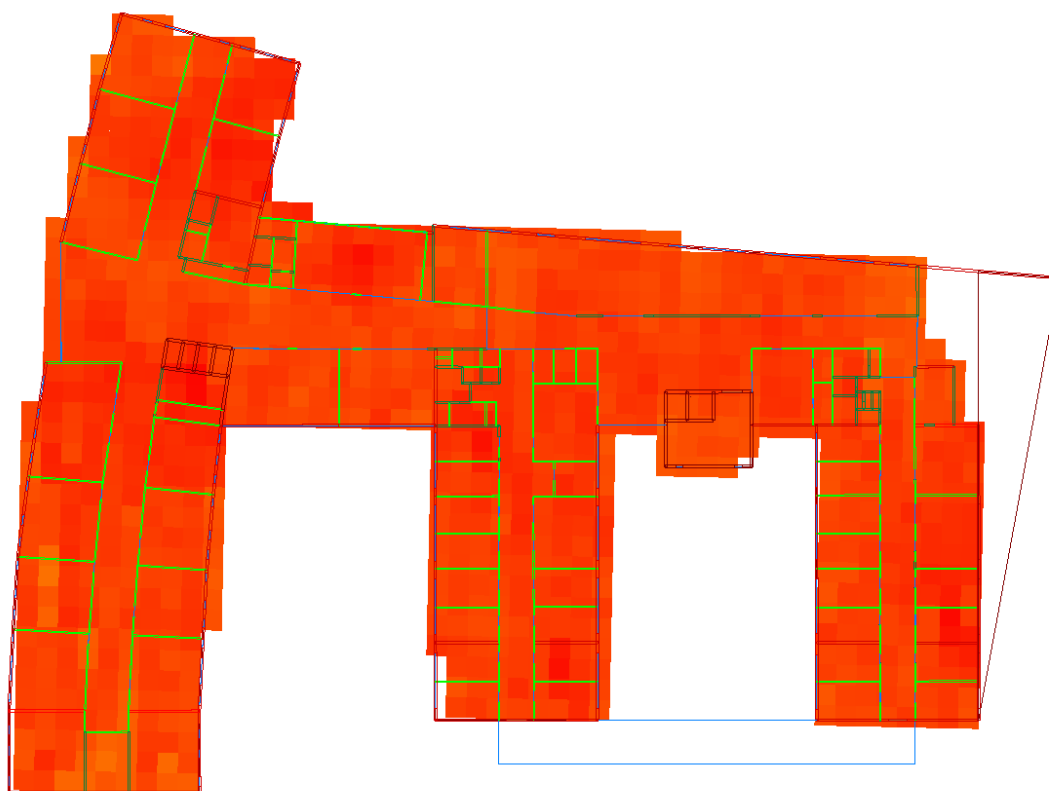
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-60	-37	-20	5



Obrázek G.10: Simulace pokrytí ve třetím podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka G.10: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.10

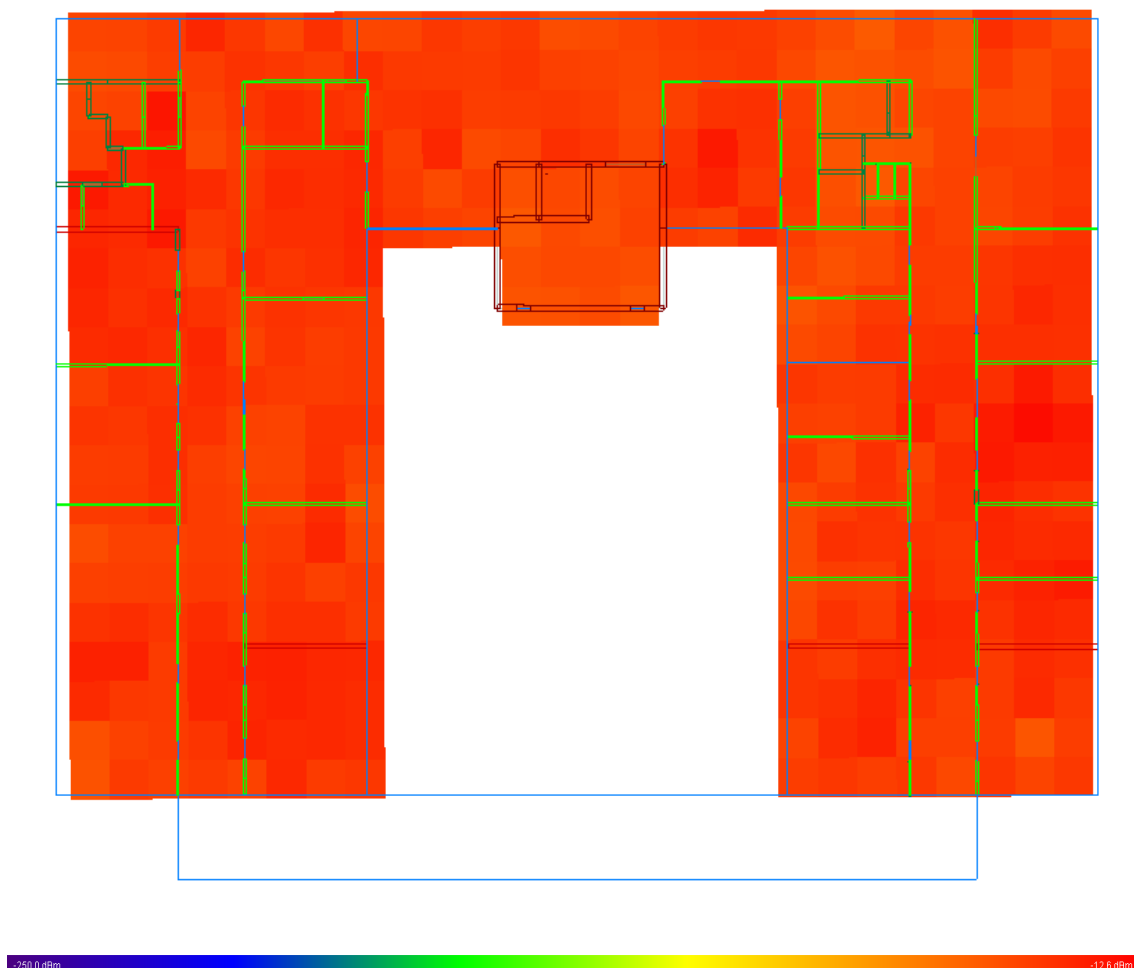
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-56	-36	-16	6



Obrázek G.11: *Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 5 GHz*

Tabulka G.11: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.11*

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-60	-39	-20	6

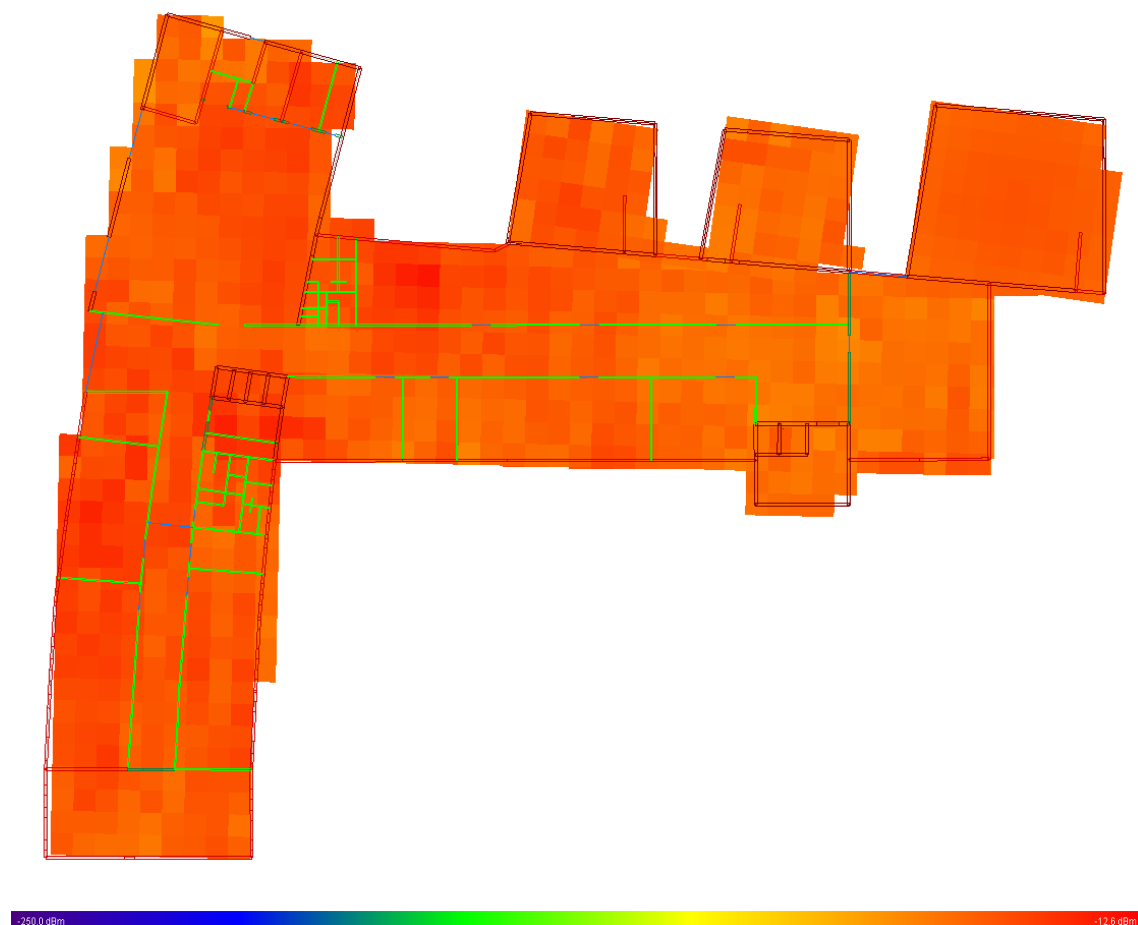


Obrázek G.12: Simulace pokrytí v pátém podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka G.12: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku G.12

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-50	-38	-21	5

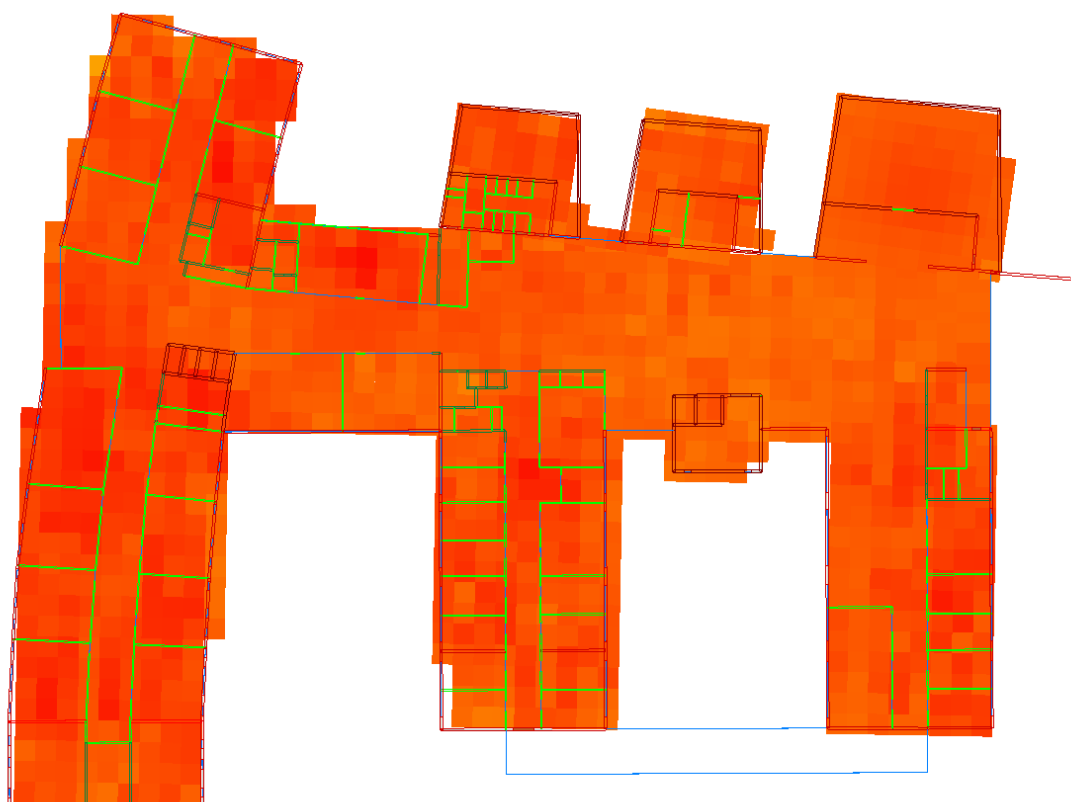
Příloha H: *Výsledky optimalizace pomocí redukce přístupových bodů*



Obrázek H.1: *Simulace pokrytí v podzemním podlaží v pásmu 2,4 GHz*

Tabulka H.1: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.1*

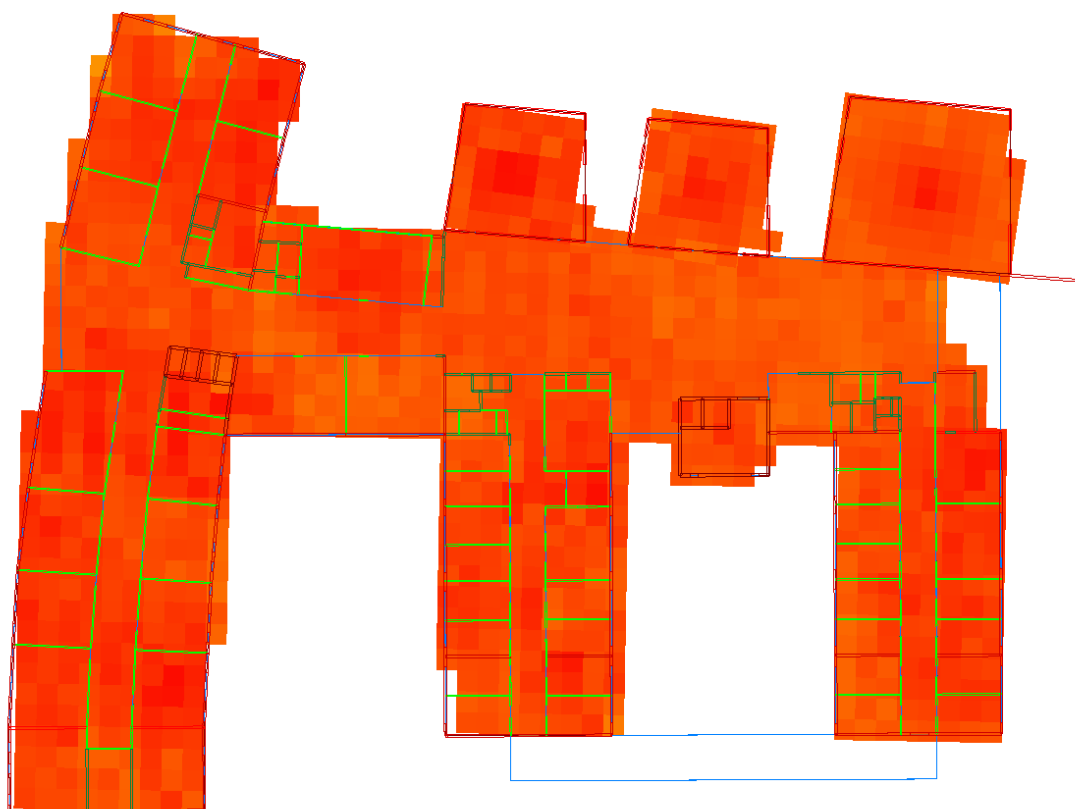
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-59	-41	-21	5



Obrázek H.2: Simulace pokrytí v prvním podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka H.2: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.2

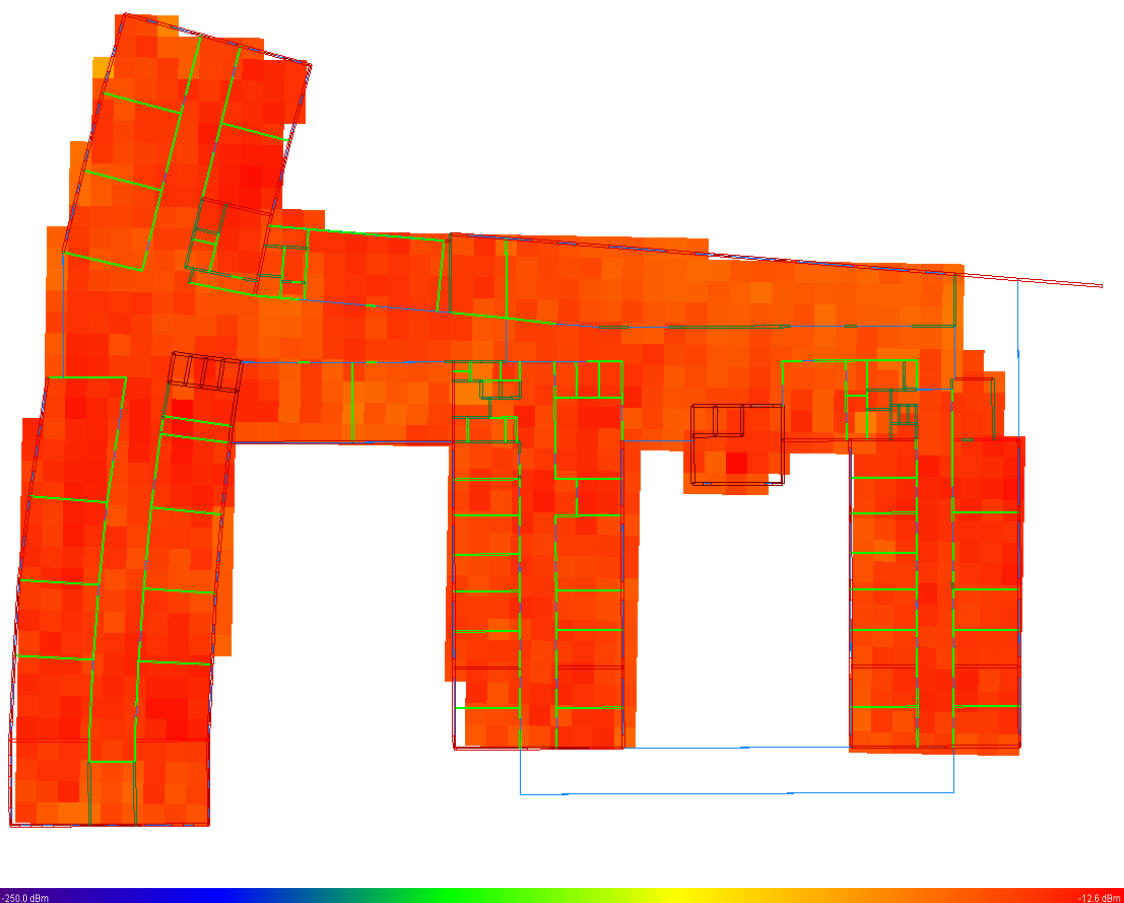
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-62	-37	-19	6



Obrázek H.3: Simulace pokrytí ve druhém podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka H.3: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.3

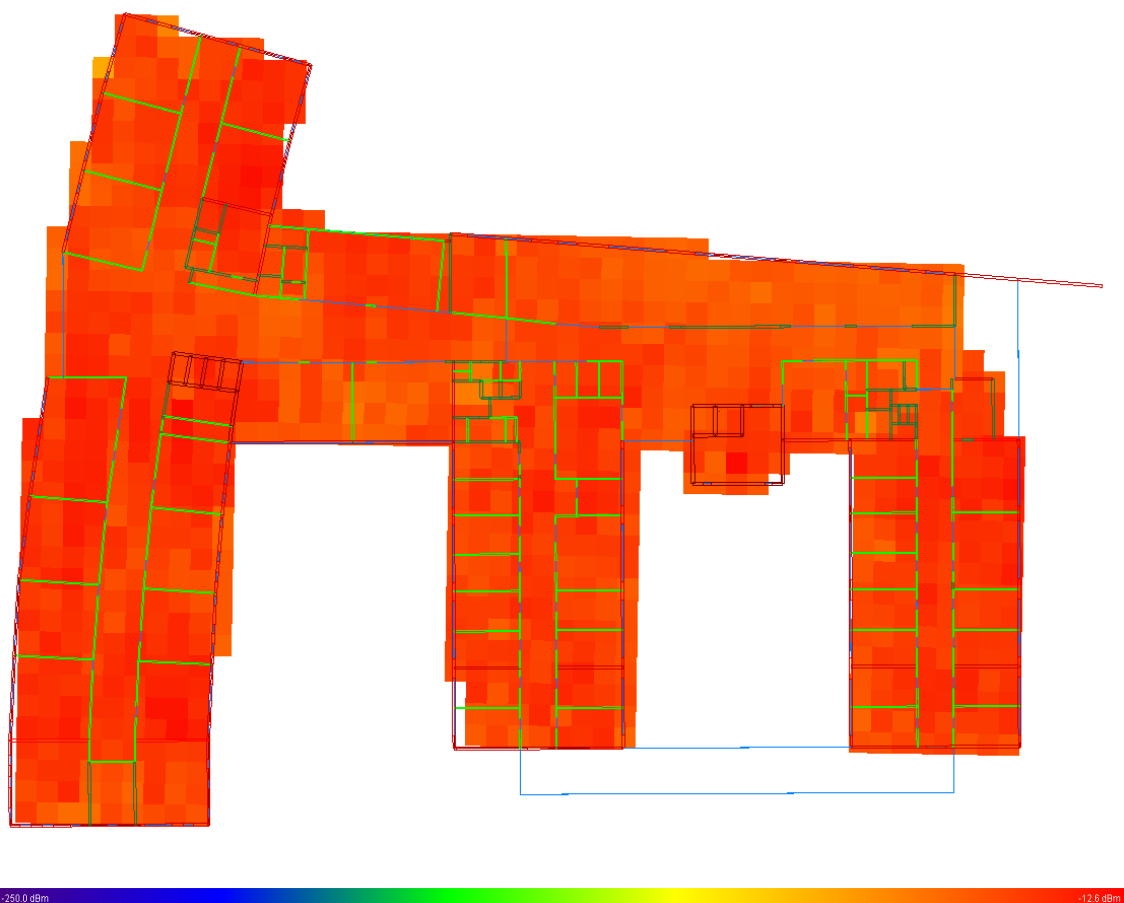
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-58	-35	-18	6



Obrázek H.4: Simulace pokrytí ve třetím podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka H.4: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.4

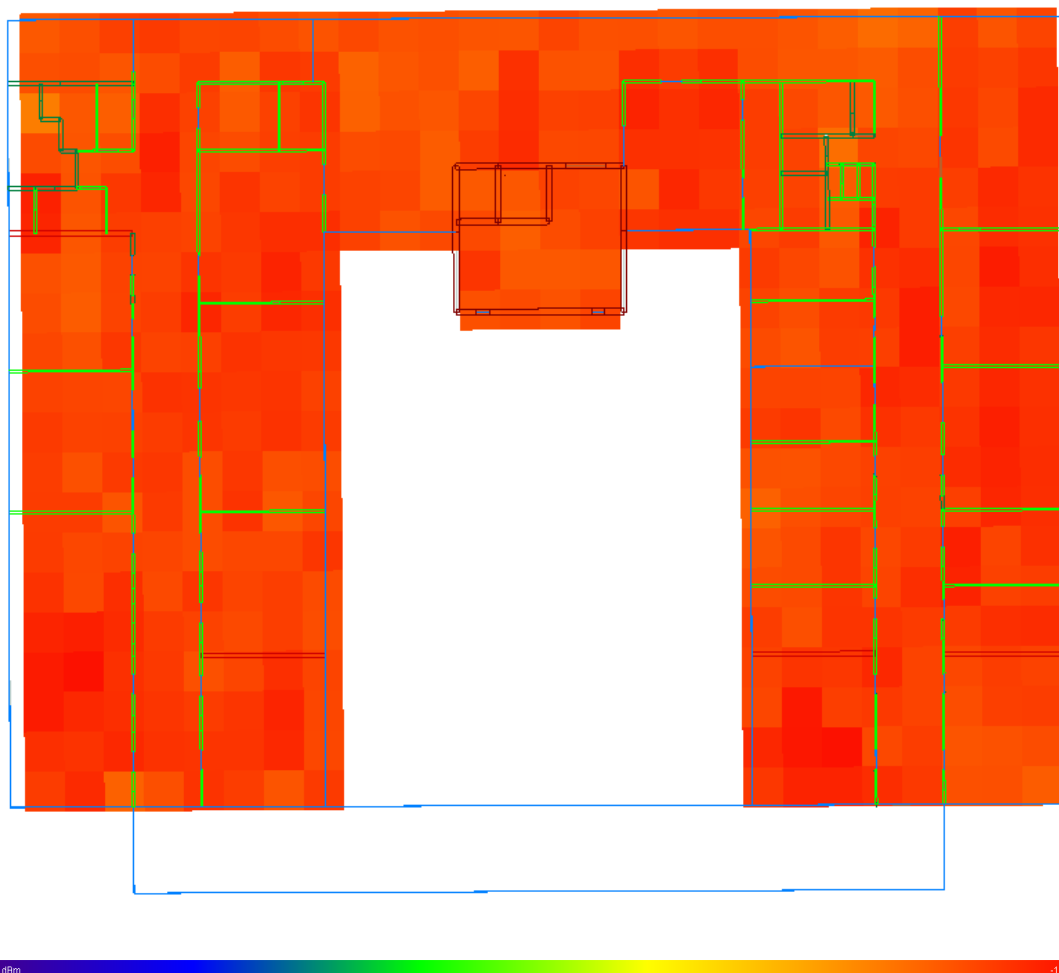
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-65	-33	-18	6



Obrázek H.5: Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka H.5: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.5

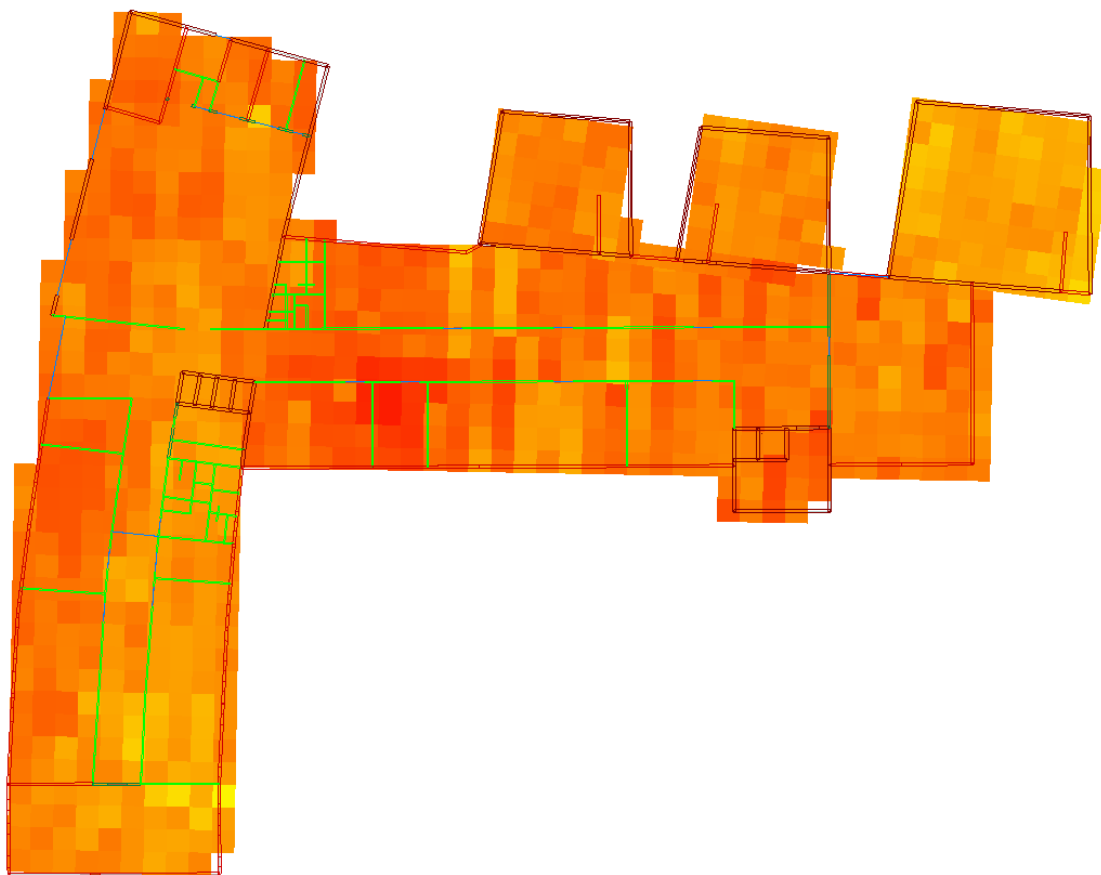
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-66	-38	-18	7



Obrázek H.6: Simulace pokrytí v pátém podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka H.6: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.6

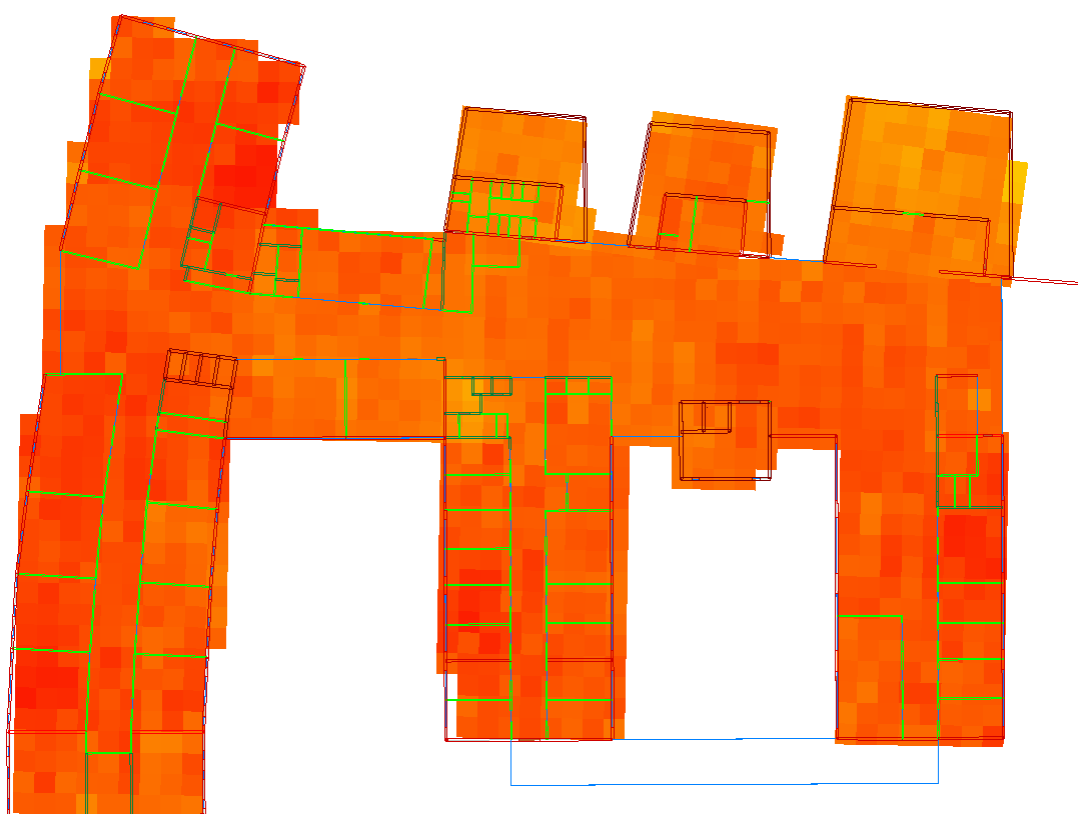
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-51	-33	-20	5



Obrázek H.7: Simulace pokrytí v podzemním podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka H.7: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.7

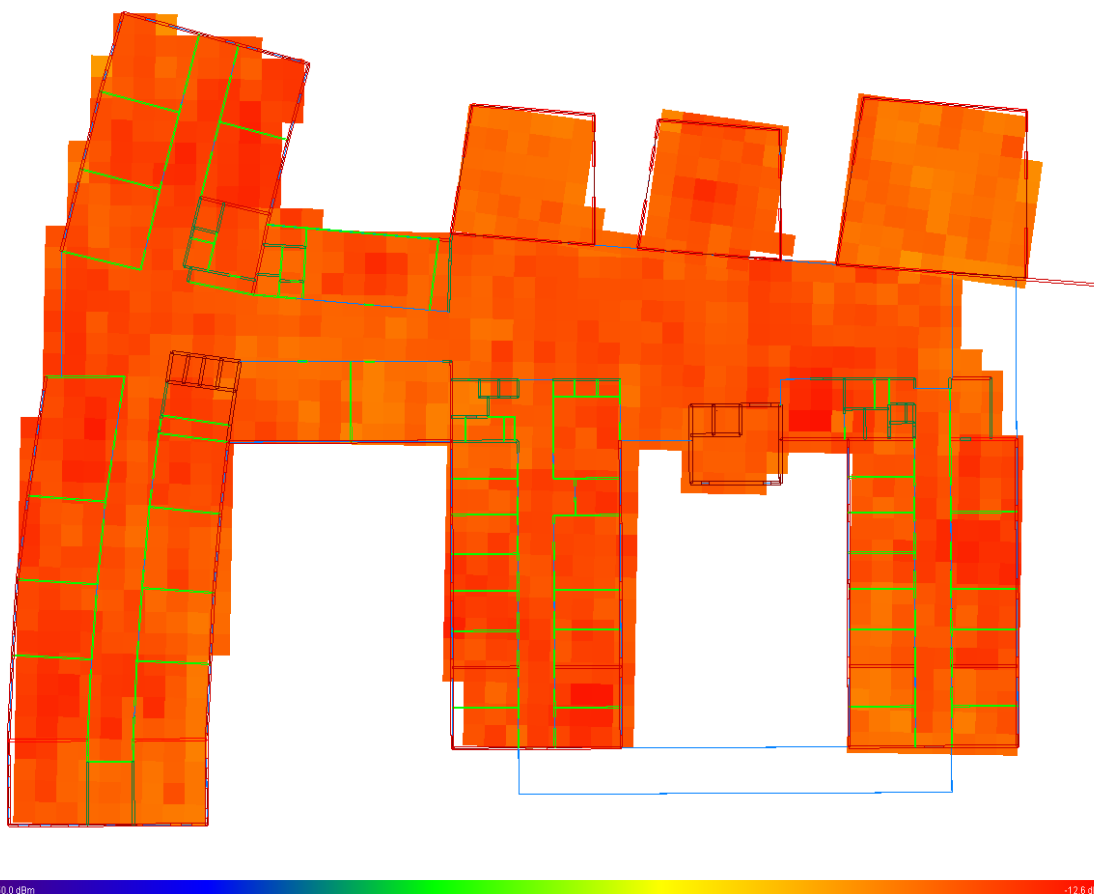
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-86	-53	-23	9



Obrázek H.8: *Simulace pokrytí v prvním podlaží v pásmu 5 GHz*

Tabulka H.8: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.8*

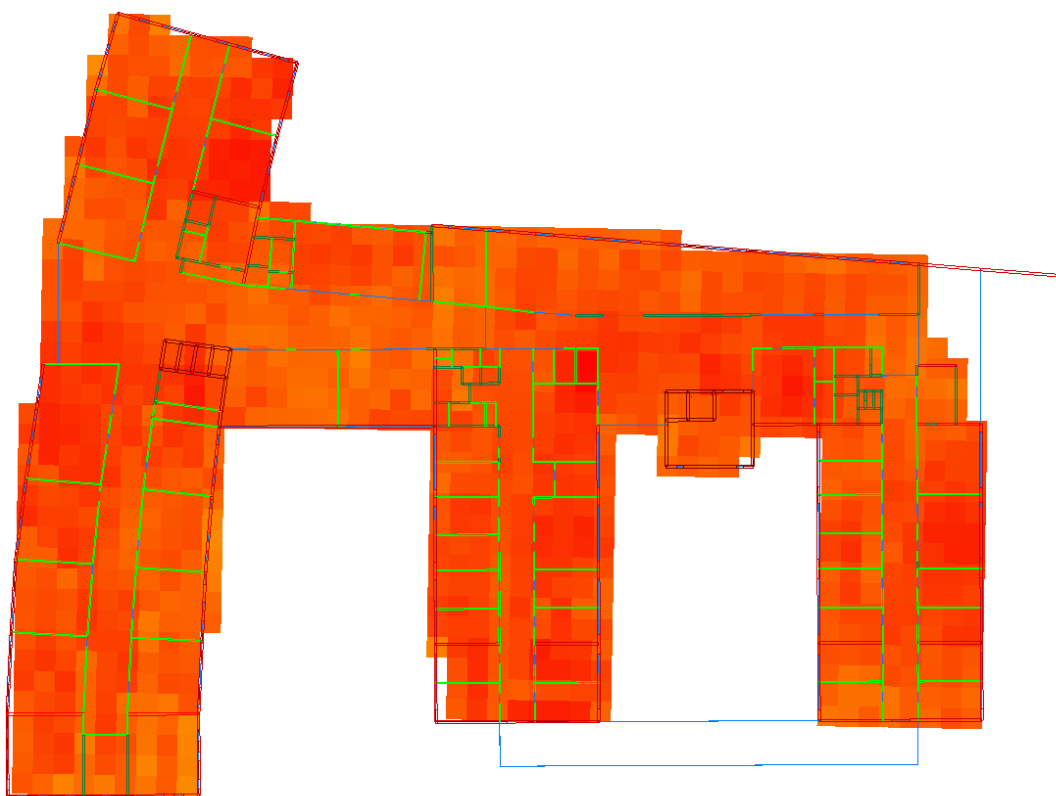
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-64	-40	-22	6



Obrázek H.9: Simulace pokrytí ve druhém podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka H.9: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.9

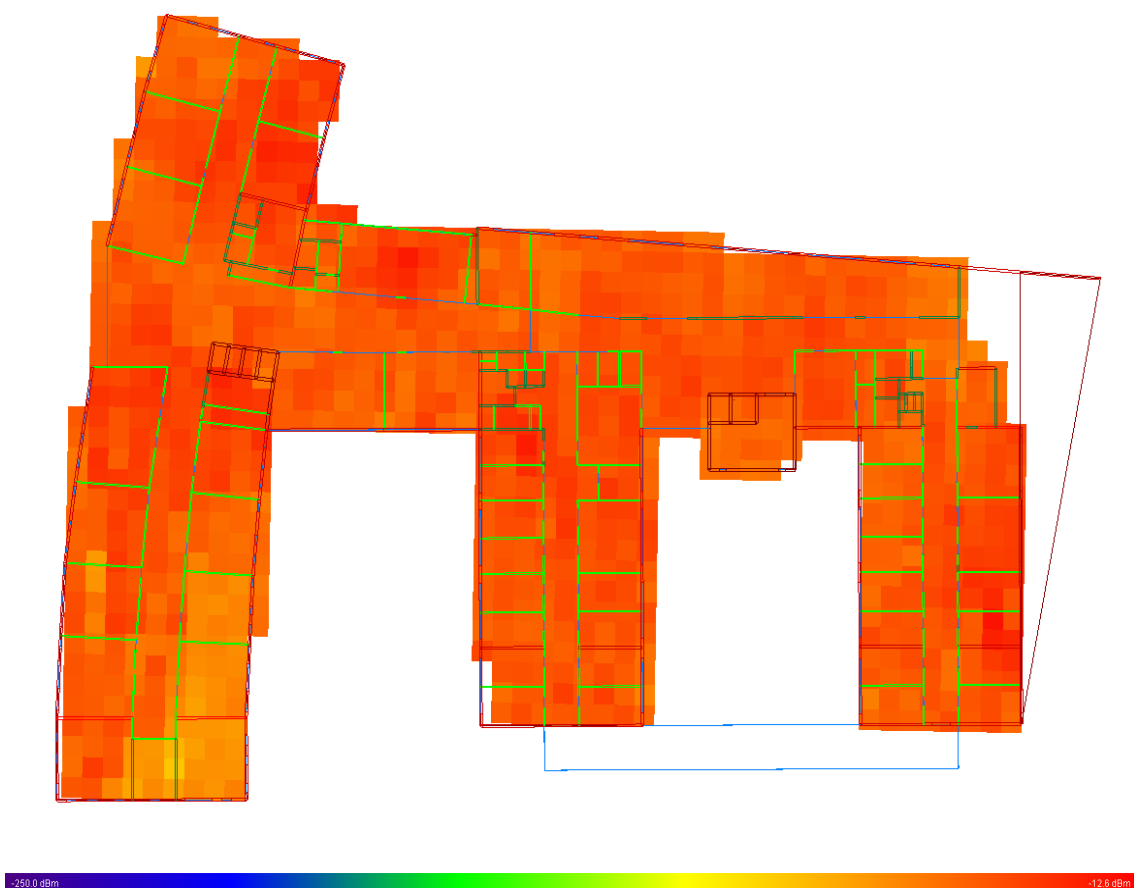
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-60	-38	-20	6



Obrázek H.10: *Simulace pokrytí ve třetím podlaží v pásmu 5 GHz*

Tabulka H.10: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.10*

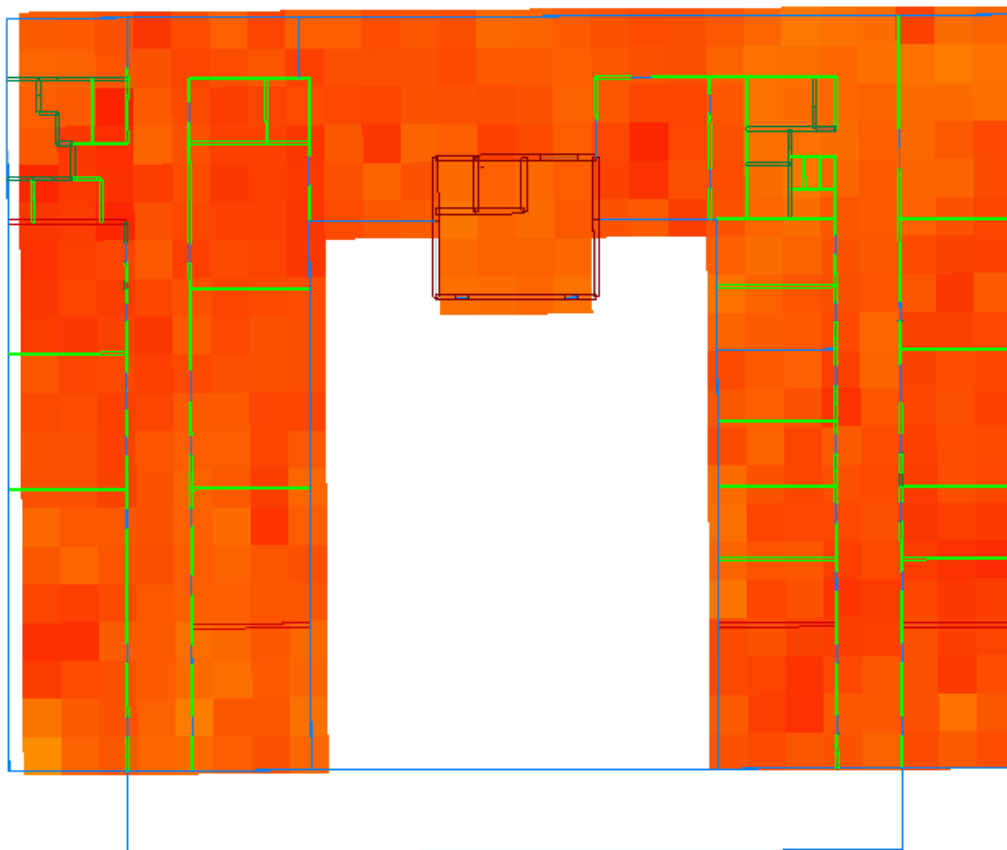
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-56	-37	-16	6



Obrázek H.11: Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka H.11: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.11

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-73	-40	-20	7

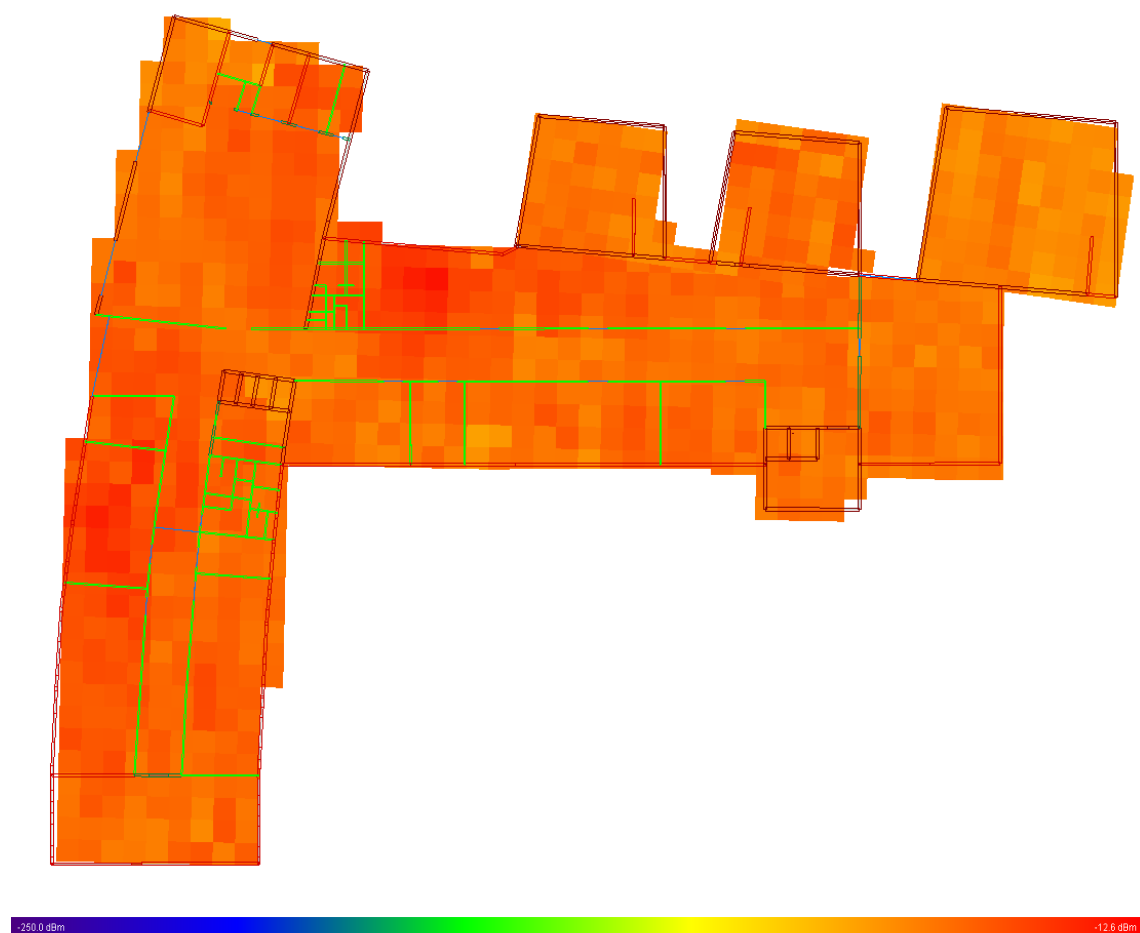


Obrázek H.11: Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka H.11: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku H.11

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-56	-39	-24	5

Příloha I: *Výsledky optimalizace pomocí redukce vysílacího výkonu*



Obrázek I.1: *Simulace pokrytí v podzemním podlaží v pásmu 2,4 GHz*

Tabulka I.1: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.1*

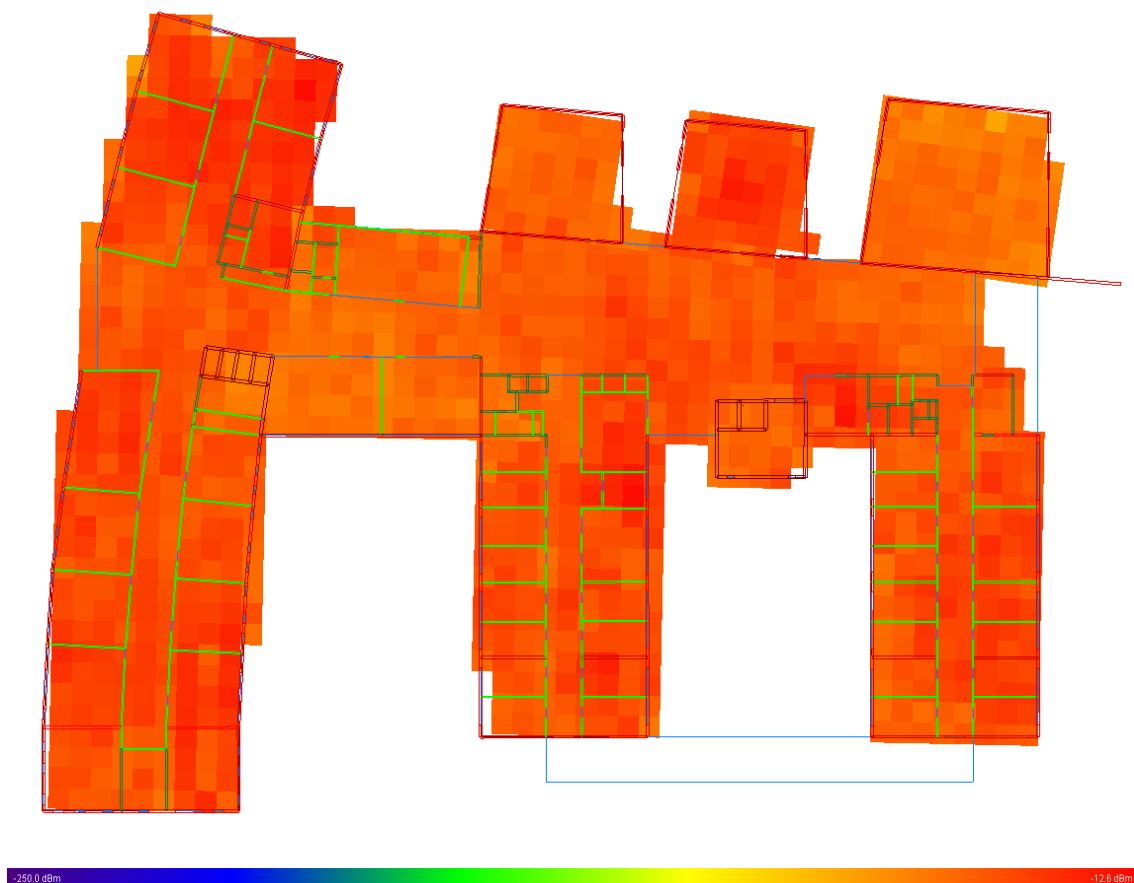
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-66	-45	-21	6



Obrázek I.2: Simulace pokrytí v prvním podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka I.2: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.1

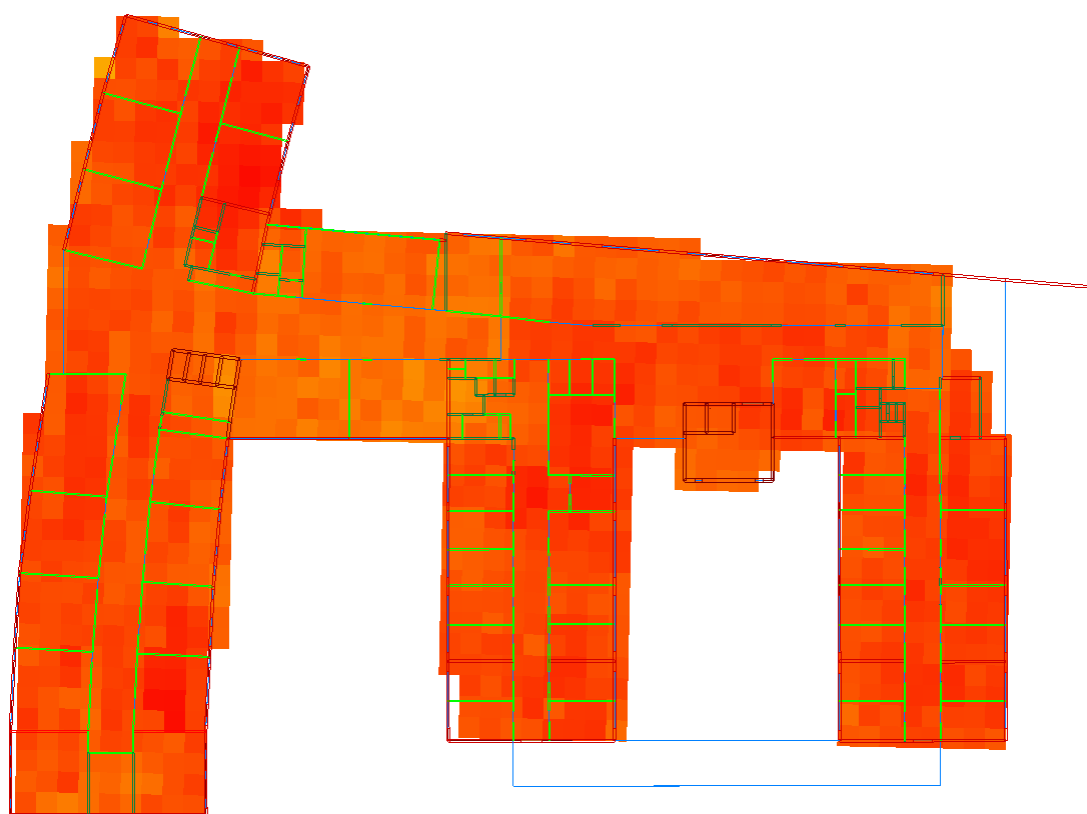
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-70	-41	-25	6



Obrázek I.3: *Simulace pokrytí ve druhém podlaží v pásmu 2,4 GHz*

Tabulka I.3: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.3*

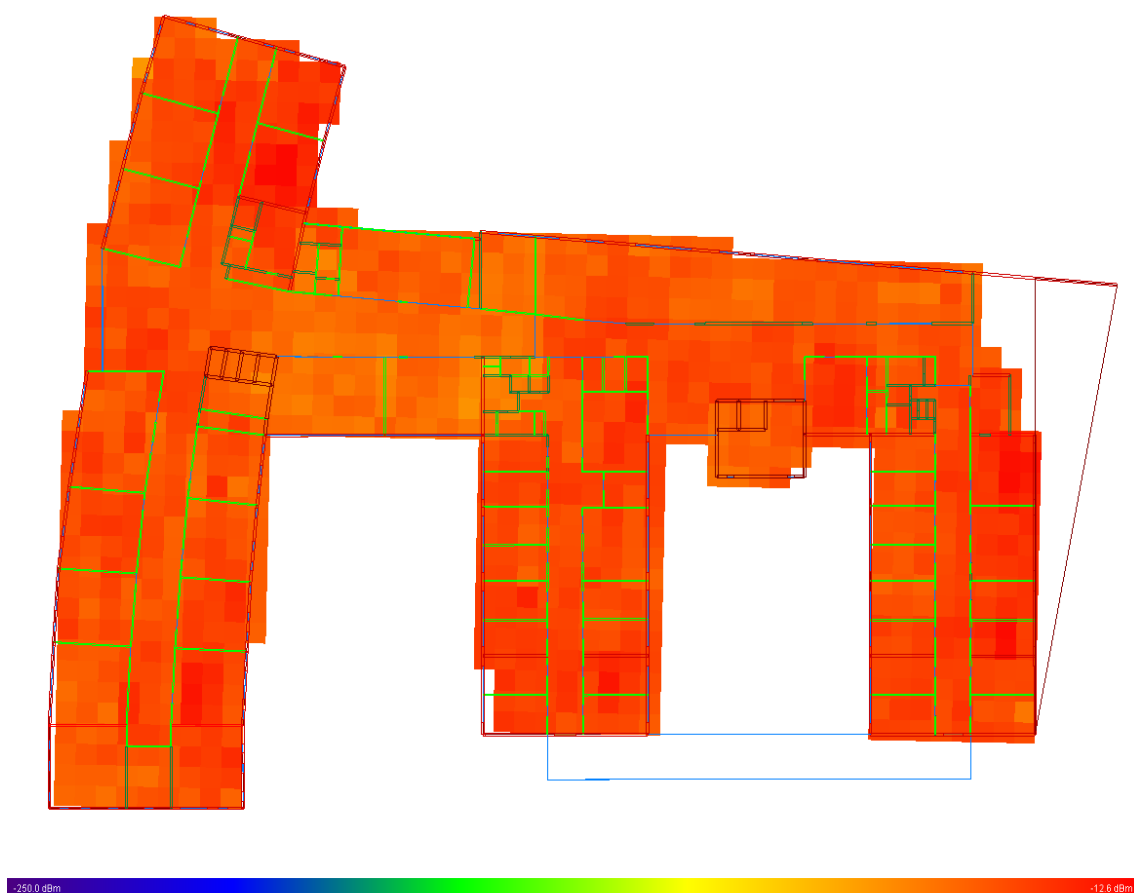
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-63	-39	-19	6



Obrázek I.4: Simulace pokrytí ve třetím podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka I.4: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.4

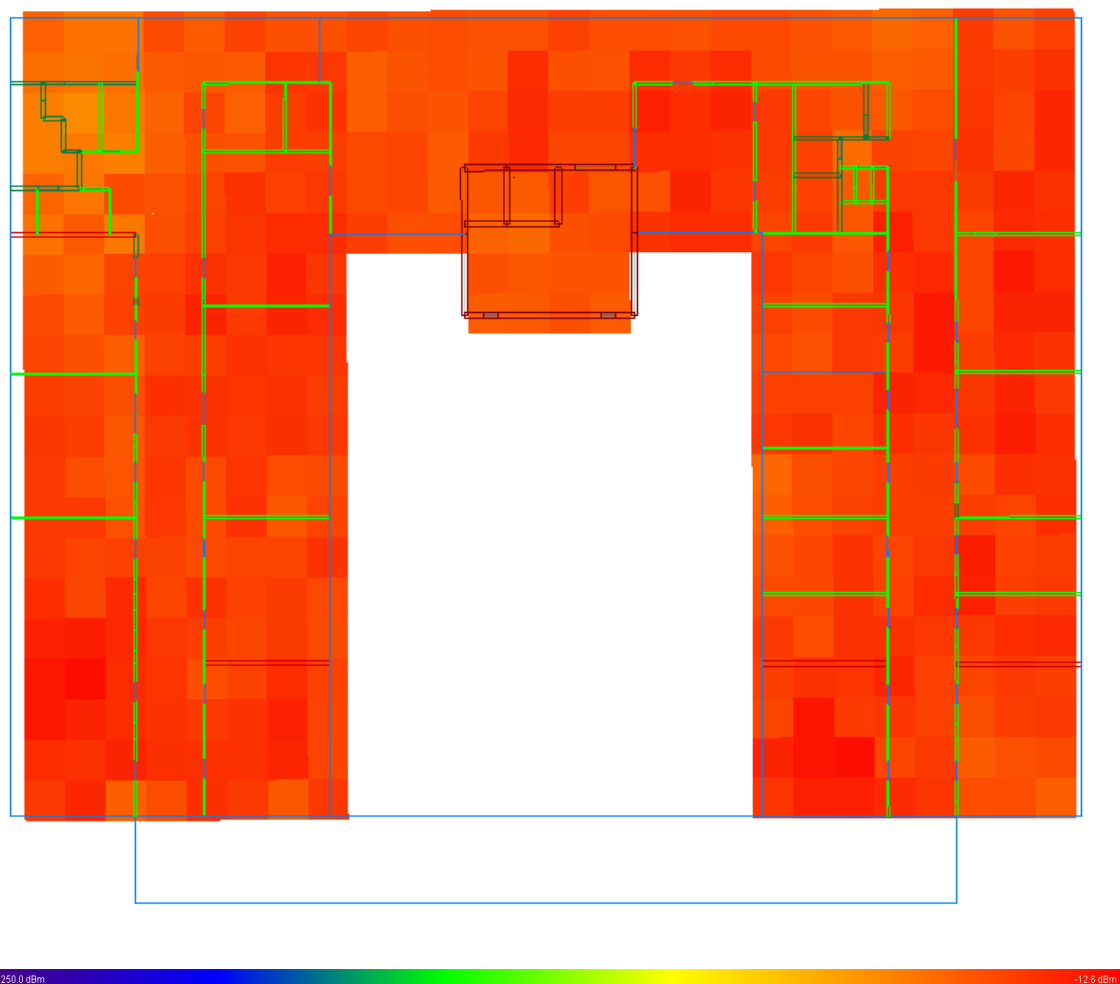
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-65	-38	-19	7



Obrázek I.5: Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 2,4 GHz

Tabulka I.5: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.5

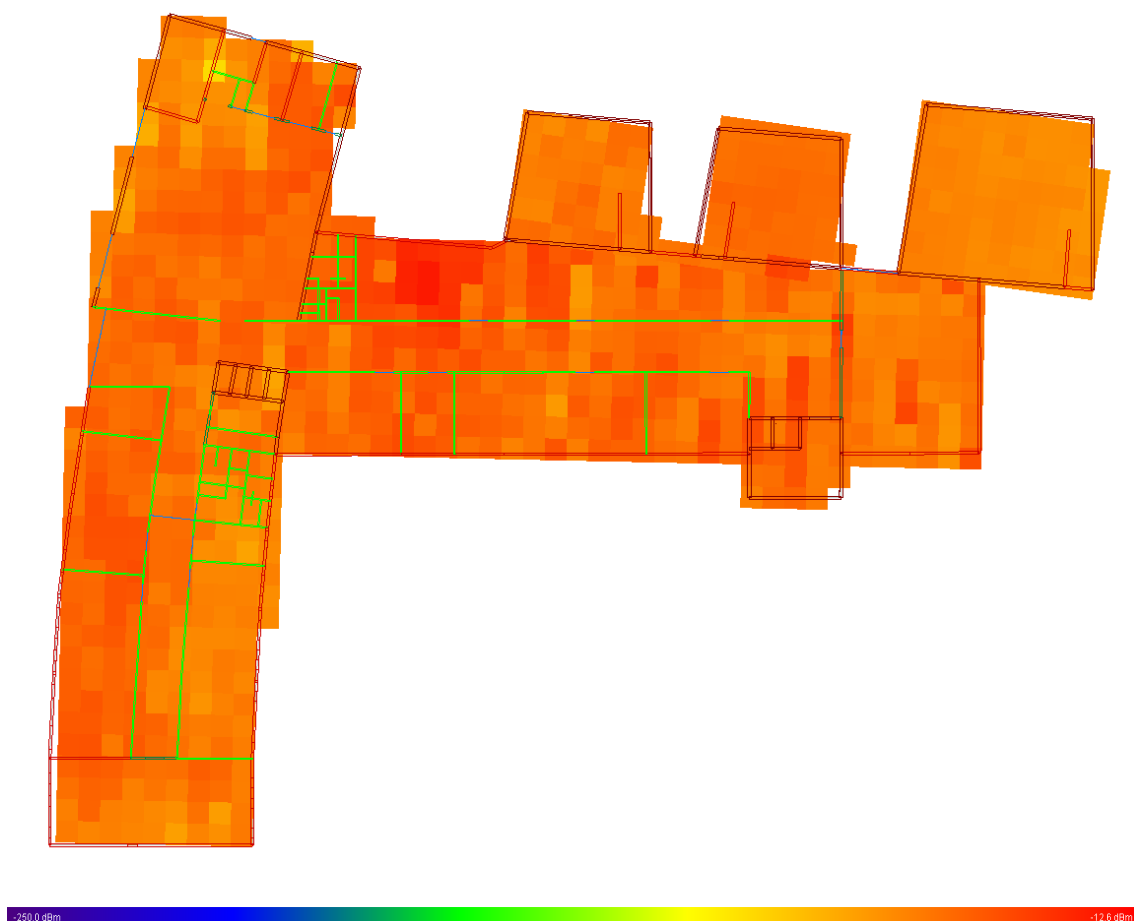
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-65	-38	-18	7



Obrázek I.6: *Simulace pokrytí v pátém podlaží v pásmu 2,4 GHz*

Tabulka I.6: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.6*

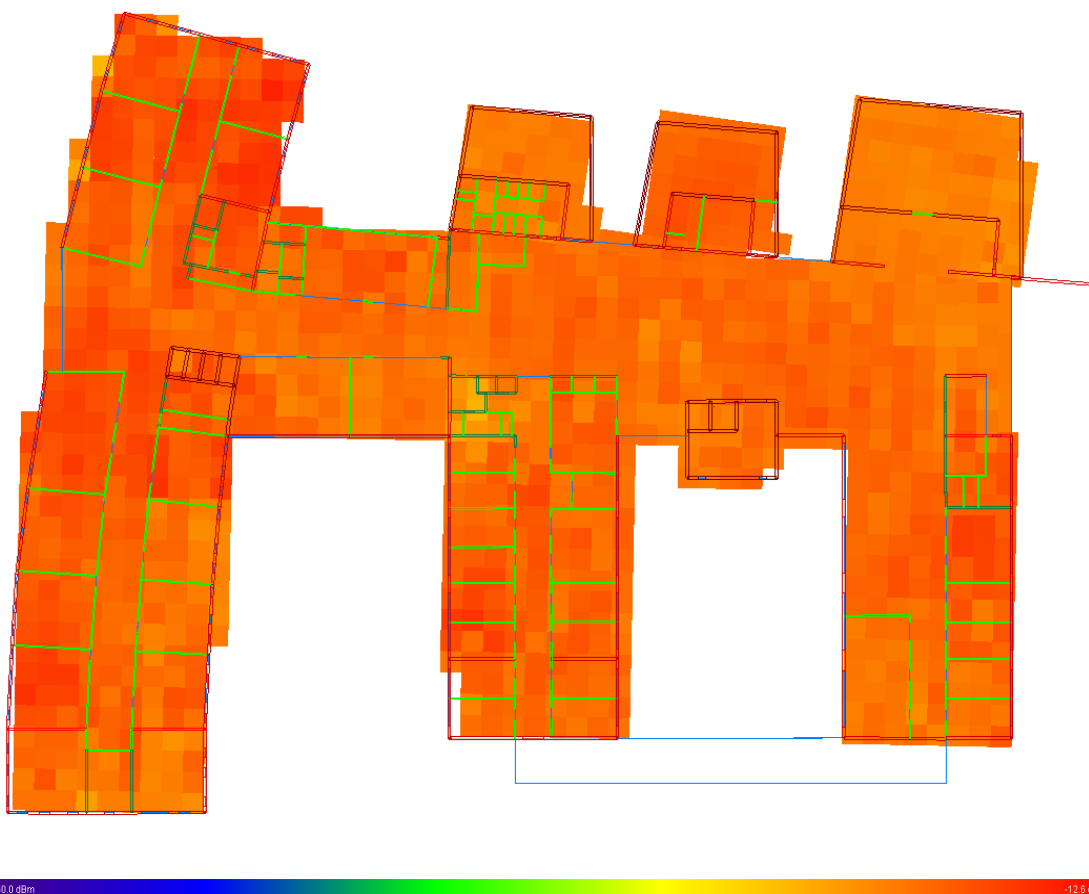
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-56	-35	-20	6



Obrázek I.7: Simulace pokrytí v podzemním podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka I.7: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.7

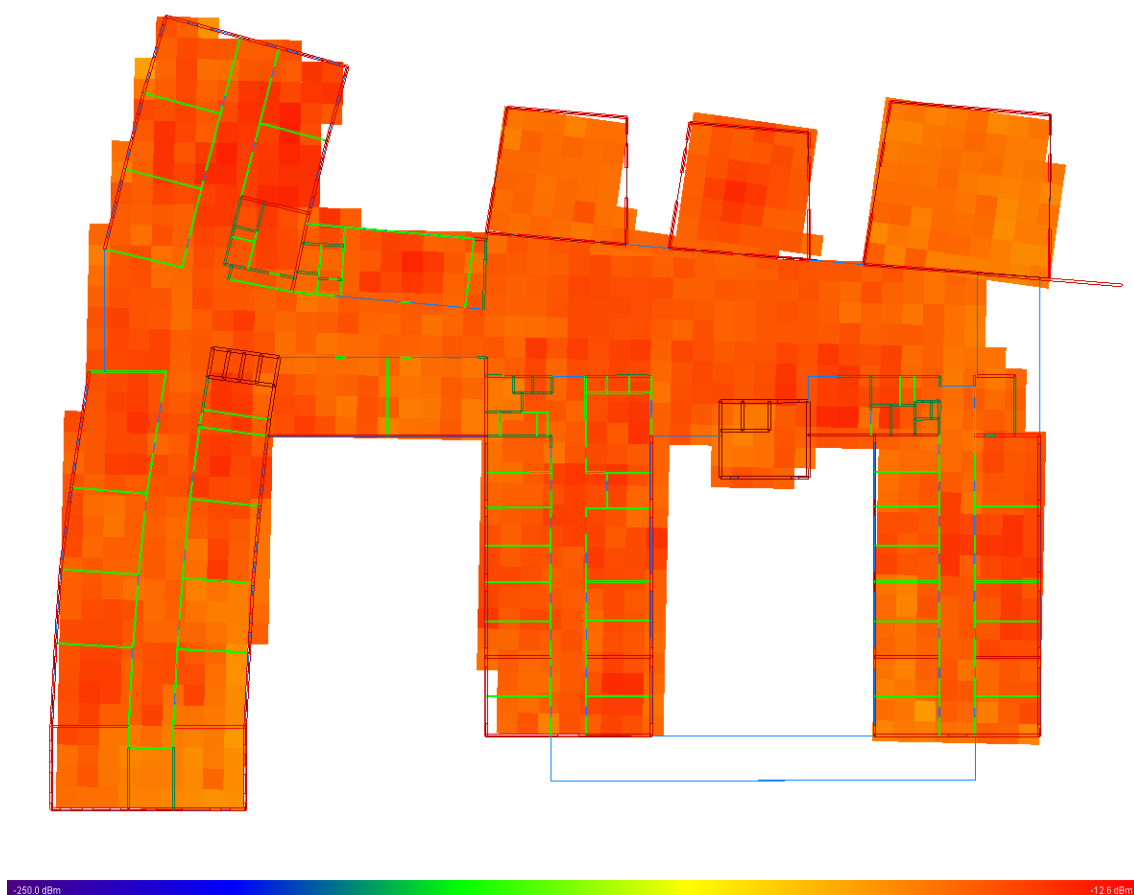
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-80	-49	-23	7



Obrázek I.8: *Simulace pokrytí v prvním podlaží v pásmu 5 GHz*

Tabulka I.8: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.8*

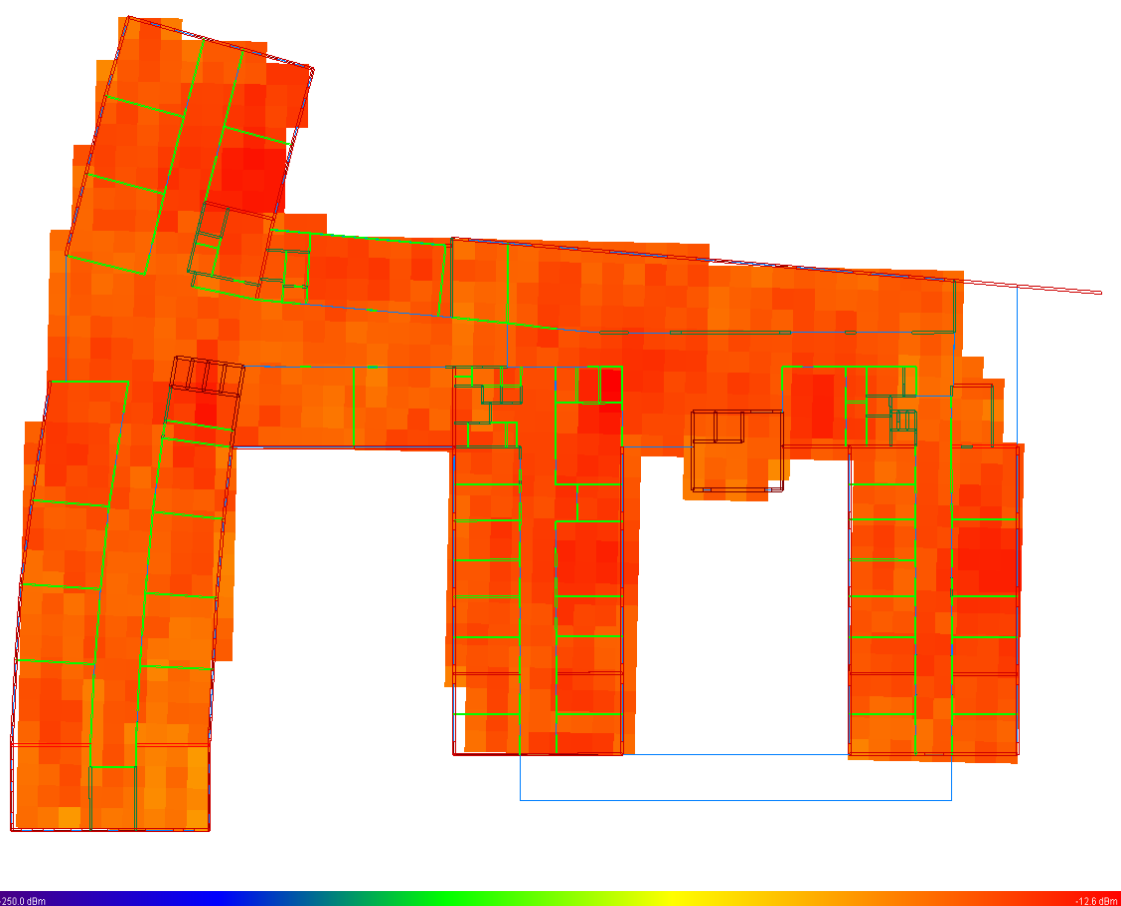
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-69	-45	-25	6



Obrázek I.9: *Simulace pokrytí ve druhém podlaží v pásmu 5 GHz*

Tabulka I.9: *Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.9*

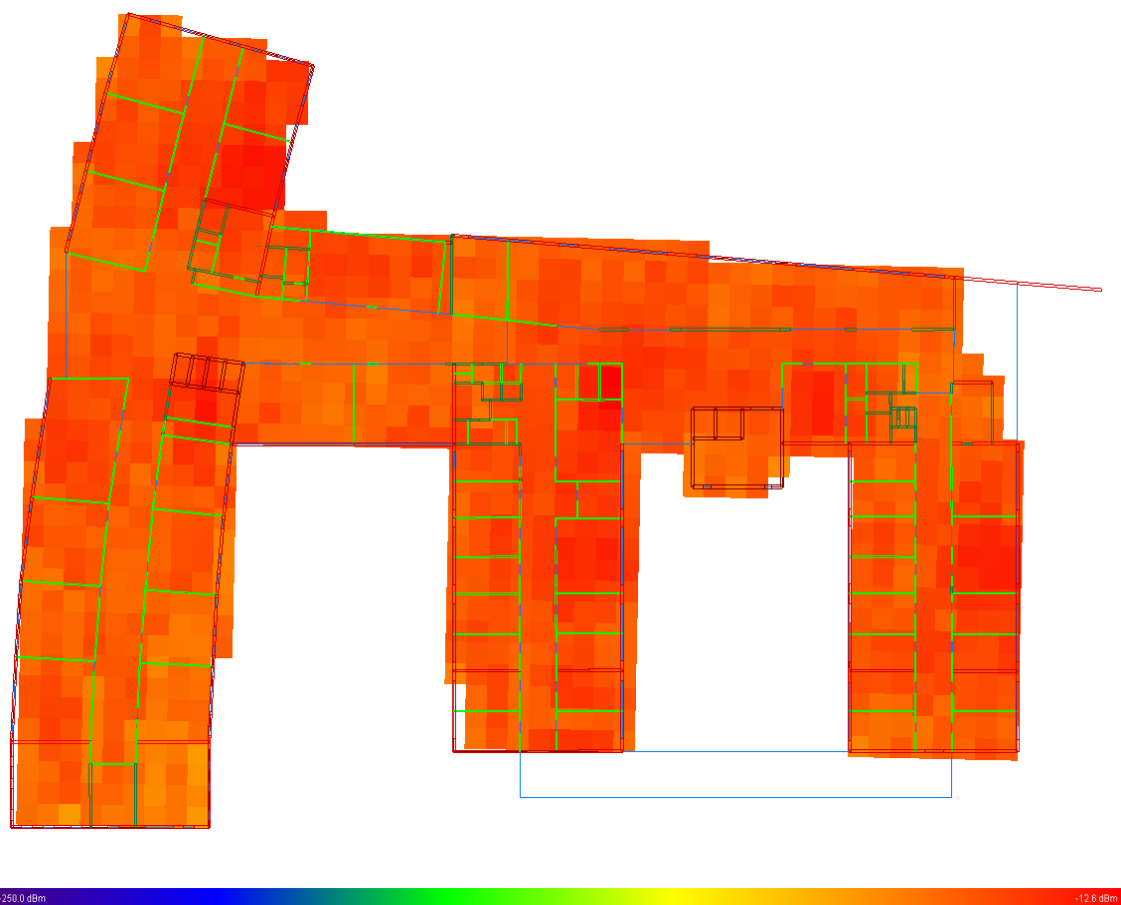
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-63	-42	-25	6



Obrázek I.10: Simulace pokrytí ve třetím podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka I.10: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.10

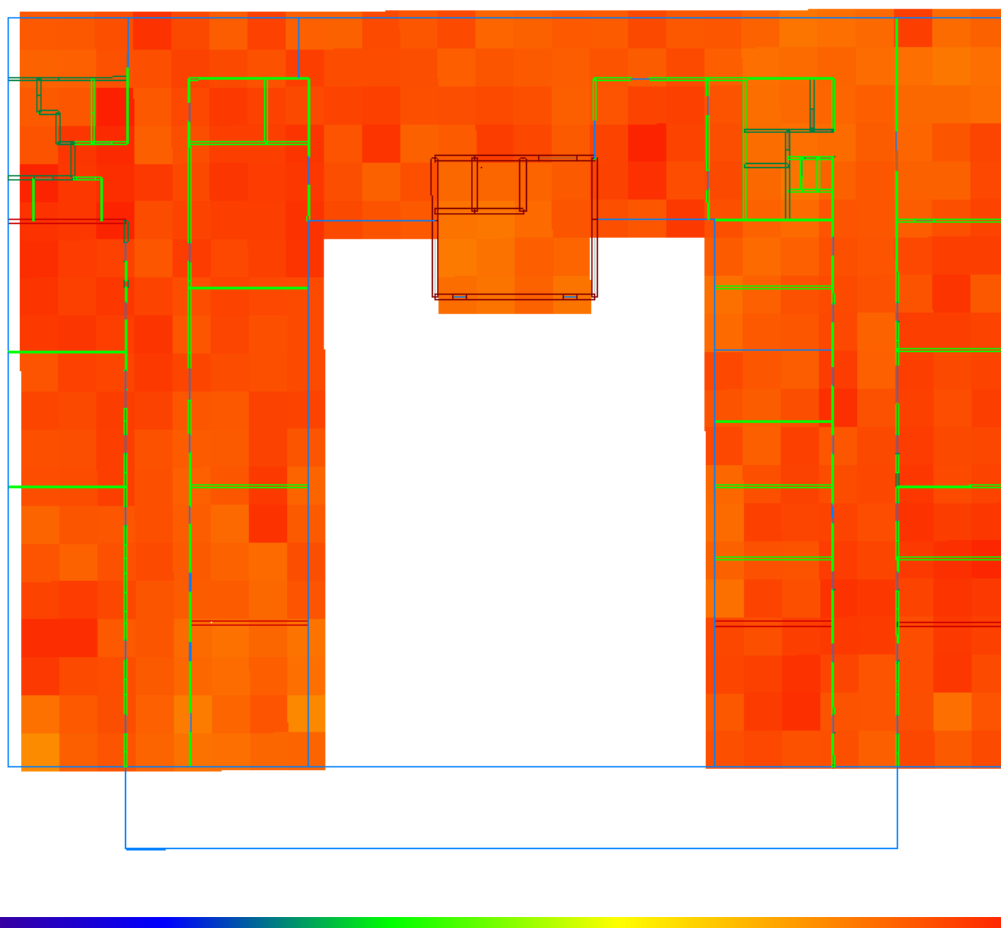
Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-61	-40	-16	6



Obrázek I.11: Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka I.11: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.11

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-73	-20	-42	7



Obrázek I.12: Simulace pokrytí ve čtvrtém podlaží v pásmu 5 GHz

Tabulka I.12: Statistické vyjádření úrovní signálů na obrázku I.12

Minimální úroveň [dBm]	Průměrná úroveň [dBm]	Maximální úroveň [dBm]	Směrodatná odchylka [dBm]
-56	-40	-25	6